

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Máquina automática para inserção de barras em rotores de motores elétricos especiais

António Rosas Garcez Lencastre



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Opção de Automação

Orientador: Prof. Francisco Jorge Teixeira de Freitas

Setembro de 2019

Máquina automática para inserção de barras em rotores de motores elétricos especiais

António Rosas Garcez Lencastre

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Opção de Automação

Resumo

O trabalho apresentado nesta dissertação teve como principal objetivo o desenvolvimento do projeto de uma máquina automática para inserção de barras em rotores de motores elétricos especiais, para a empresa *WEG S.A.*. Este processo, até ao momento, é totalmente manual, sendo uma das melhorias mais necessárias na linha de produção da empresa.

Com esse objetivo, o processo manual foi estudado e analisado, de modo a identificar todos os requisitos a cumprir pela máquina a desenvolver. Foi realizada uma primeira abordagem conceptual para a possível solução, sendo esta posteriormente analisada e criticada. Com a identificação de uma solução primária viável, foi desenvolvida uma solução construtiva, baseada nas ideias previamente definidas. O desenvolvimento desta solução decorreu em paralelo com o desenvolvimento de uma proposta de comando para todos os movimentos inerentes à automatização da máquina. Assim, a solução obtida envolve uma diversidade de acionamentos, sendo conjugadas soluções pneumáticas, hidráulicas e eletromecânicas, com diferentes abordagens de comando, desde comando em malha aberta a mecanismos servocomandados, de modo a obter o melhor desempenho possível para a máquina, adequando cada acionamento às especificidades dos movimentos.

Definida a solução construtiva e a respetiva proposta de comando, foi analisado o desempenho da máquina, através de uma pequena simulação temporal do seu funcionamento. A proposta para a máquina foi analisada, verificando-se que cumpria os requisitos inicialmente impostos, tanto a nível temporal como a nível das operações a realizar. A viabilidade e utilidade da automatização do processo foram assim justificadas, demonstrando que, com a implementação desta máquina, a linha de produção deste tipo de motores elétricos melhora significativamente, apresentando diversos benefícios, como a redução de mão de obra necessária, a melhoria das condições de trabalho e qualidade do produto final e a diminuição dos tempos necessários para a produção.

No final, concluiu-se que o objetivo principal da dissertação foi atingido, sendo o projeto desenvolvido satisfatório, cumprindo os requisitos do processo e automatizando diversos componentes, sendo assim capaz de melhorar a linha de produção e reduzir a mão de obra necessária. Assim, esta dissertação serve como base para o projeto de construção da máquina, tratando-se de um estudo prévio da viabilidade da automatização do processo manual de inserção de barras em rotores de motores elétricos especiais.

Automatic machine for insertion of metallic bars in rotors of squirrel cage induction motors

Abstract

The present work had as main objective the design of an automatic machine for inserting bars in rotors of squirrel cage motors, for company *WEG S.A.*. This process has always been fully manual, being one of the important bottleneck's in the production line of the company.

With this in mind, the manual process was studied and analyzed, in order to identify all the requirements to be fulfilled by the machine to be developed. A first conceptual approach was developed for a possible solution, and subsequently analyze and criticized. With the identification of a viable primary solution, a constructive solution was developed, based on the previously defined ideas. The development of this solution was in parallel with the development of a command proposal for all the movements inherent to machine automation. Thus, the obtained solution presents a diversity of energy systems, combining pneumatics, hydraulics and electromechanical components, each with different command approaches, from open loop to closed loop, all to achieve the best performance possible for the machine and adjust each operation to it's specific needs.

Having defined the constructive solution and its proposed command, the performance of the machine was studied through a small time simulation based on its operation. Thus, the proposal for the machine was analyzed, verifying that it complied with the requirements imposed. The viability and utility of automating this process was then justified, proving that, with the construction of this machine, there will be various improvements in the production line as: reduction of labour costs, improvement of work conditions and quality of the final product and a reduction of the global production times.

In the end, it is concluded that the main objective of the dissertation was achieved, being the project developed satisfactorily, fulfilling the requirements of the process and automating several of it's components, consequently improving the production line and reducing labour costs. Thus, this dissertation serves as a basis for the construction of the machine, representing a previous study of the feasibility of automating the manual process of inserting bars into rotors of squirrel cage induction motors.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, o professor Francisco Freitas, por toda a ajuda prestada, por todo o apoio, disponibilidade e por tudo o que me ensinou.

Queria também agradecer à *WEG S.A.* pela oportunidade oferecida e pela disponibilidade demonstrada durante estes projecto, em especial aos Eng. Pedro Maia e Jorge Sousa.

À minha colega no laboratório, Ana Salgueirinho, e ao Sr. Joaquim, por toda a ajuda e por tornarem o laboratório como uma segunda casa durante todo o semestre, fazendo com que os dias nunca fossem monótonos.

À minha família, que sempre me apoiou.

A todos os meus amigos, do curso e fora dele, que me ajudaram durante estes 5 anos, em especial à Leonor.

Muito obrigado.

António Lencastre

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Apresentação <i>WEG S.A.</i> e <i>WEG Portugal</i>	1
1.3	Objetivos da dissertação	3
1.4	Estrutura da dissertação	3
2	Descrição do problema proposto	5
2.1	Introdução	5
2.2	Motores elétricos de média e alta tensão	5
2.2.1	Motores elétricos de indução trifásicos - Princípios de funcionamento . .	6
2.2.2	Rotores de motores elétricos de indução de média e alta tensão	8
2.3	Processo de produção atual	10
2.3.1	Descrição do processo de produção atual	10
2.3.2	Análise de tempos de ciclo do processo atual	14
2.4	Requisitos do processo	15
2.4.1	Requisitos dimensionais	15
2.4.2	Requisitos funcionais	17
2.5	Conclusão	19
3	Solução conceptual	21
3.1	Introdução	21
3.2	Análise dos requisitos do processo e princípio da solução	21
3.3	Descrição da solução proposta e identificação dos conjuntos funcionais	24
3.3.1	Identificação dos conjuntos funcionais	24
3.4	Descrição e caracterização conceptual dos conjuntos funcionais	26
3.4.1	Conjunto A - Estrutura de suporte	26
3.4.2	Conjunto B - Ferramenta de manipulação	30
3.4.3	Conjunto C - Módulo de alimentação das barras	35
3.4.4	Reconfigurações da máquina	37
3.5	Conclusão	38
4	Solução construtiva	39

CONTEÚDO

4.1	Introdução	39
4.2	Solução global	39
4.3	Conjunto funcional A	41
4.3.1	Componente A1- Base	41
4.3.2	Componente A2- Estrutura porticada	43
4.3.3	Componente A3 - Viga de interligação	44
4.3.4	Componente A4 - Apoio fixo do rotor	46
4.3.5	Componente A5 - Apoio móvel do rotor	48
4.4	Conjunto funcional B	50
4.4.1	Componente B1 - Viga da ferramenta de manipulação	50
4.4.2	Componente B2 - Grampo da direita	55
4.4.3	Componente B3 - Grampo da esquerda	57
4.4.4	Componente B4 - Sistema de cravação	61
4.4.5	Componente B5 - Sistema de rotação	64
4.4.6	Componente B6 - Sistema de posicionamento	65
4.4.7	Componente B7 - Batentes do rotor	68
4.4.8	Componente B8 - Esbarro móvel	70
4.5	Conjunto funcional C	71
4.5.1	Componente C1 - Depósito de barras	71
4.5.2	Componente C2 - Mesa de elevação das barras	78
4.6	Conclusão	80
5	Proposta de comando	81
5.1	Introdução	81
5.2	Comando dos movimentos	81
5.2.1	Conjunto funcional A	82
5.2.2	Conjunto funcional B	87
5.2.3	Conjunto funcional C	106
5.3	Sequência de trabalho	113
5.4	Avaliação temporal	114
5.4.1	Parâmetros e avaliação temporal	116
5.4.2	<i>Grafcet</i> Principal	117
5.4.3	Folhas dos <i>Macrografcets</i>	117
5.4.4	Análise da avaliação temporal	124
5.5	Conclusão	127
6	Conclusões e trabalhos futuros	129
6.1	Conclusões	129
6.2	Trabalhos futuros	131

CONTEÚDO

Referências	133
A Circuitos de comando	135
B <i>Grafsets</i>	141

CONTEÚDO

Lista de Figuras

1.1	Unidades fabris da <i>WEG Portugal</i>	2
2.1	Motor <i>WEG</i> utilizado no triturador LYNXS	6
2.2	Rotor e estator de um motor elétrico	7
2.3	Enrolamentos no estator	7
2.4	Fases no estator	7
2.5	Rotor em gaiola de esquilo	8
2.6	Motor elétrico de indução de alta tensão	9
2.7	Rasgos nas ranhuras do rotor	9
2.8	Anéis de curto circuito do rotor	10
2.9	Rotor apoiado nos roletes de nylon	11
2.10	Rebaixo maquinado no extremo da barra	11
2.11	Desalinhamentos nas chapas do rotor	12
2.12	Ferramentas adequadas à secção da barra e martelo pneumático	12
2.13	Barras alinhadas com extremos a 50 mm da face do rotor	13
2.14	chapas de aperto do rotor depois da compressão	14
2.15	Vista de topo dos rotores de dimensão limite	16
2.16	Vista de lado dos rotores de dimensão limite	16
2.17	Secções de barras	17
3.1	Esquema da solução inicial proposta com os conjuntos funcionais identificados	25
3.2	Esquema da solução inicial proposta com um rotor de dimensão máxima em posição de trabalho	26
3.3	Componentes do conjunto funcional A	28
3.4	Esquema da ferramenta de manipulação	31
3.5	Esquema da deteção da barra no grampo móvel	32
3.6	Esquema da mesa de elevação	36
4.1	Solução construtiva - Modelo global	40
4.2	Dimensões gerais da máquina	40
4.3	Conjunto funcional A - solução construtiva	42
4.4	Componente A1 - Base	43
4.5	Componente A2 - Estrutura porticada	43
4.6	Componente A3 - Viga de interligação	44

LISTA DE FIGURAS

4.7	Movimento A30 - Servomotor A30 e fuso de esferas	45
4.8	Ligações dos cilindros A31	46
4.9	Componente A4 - Apoio fixo do rotor	47
4.10	Atuador A40	47
4.11	Componente A5 - Apoio móvel do rotor	48
4.12	Movimento A50	49
4.13	Movimento A50 - vistas adicionais em corte	49
4.14	Conjunto funcional B - solução construtiva	50
4.15	Componente B1 - Viga da ferramenta de manipulação	52
4.16	Modelo de uma carruagem (B10 a B13)	52
4.17	Secção do componente B1 - Detalhe dos movimentos B10 a B13	53
4.18	Detalhes construtivos associados aos movimentos B10 a B13	54
4.19	Componente B2 - grampo da direita	55
4.20	Movimento B20	56
4.21	Ferramenta do grampo para barra de dimensões $90 \times 20 \text{ mm}$ e uma de $30 \times 8 \text{ mm}$	56
4.22	Detector de barras no componente B2	57
4.23	Detector de barras no componente B2 - Vistas em corte	57
4.24	Componente B3 - Grampo da esquerda	58
4.25	Ferramenta de guiamento de barra de dimensões $90 \times 20 \text{ mm}$ e de $30 \times 8 \text{ mm}$	58
4.26	Movimento B32 - Ferramenta de aperto	60
4.27	Peça de aperto de barras para uma barra de dimensões $90 \times 20 \text{ mm}$	60
4.28	Componente B4 - Sistema de cravação montado carruagem de cravação	61
4.29	Movimento B40	62
4.30	Movimento B41	63
4.31	Componente B5 - Sistema de rotação	64
4.32	Movimento B50	65
4.33	Componente B6 - Sistema de posicionamento	66
4.34	Movimentos B60 e B61	67
4.35	Componente B7 - Batente do rotor	68
4.36	Movimento B70	69
4.37	Apoio dos batentes para rotores limite	70
4.38	Componente B8 - Esbarro móvel	70
4.39	Conjunto funcional C - solução construtiva	71
4.40	Componente C1 - Depósito de barras	72
4.41	Base de armazenamento e transporte de barras	73
4.42	Base com barras limite	73
4.43	Base inserida no depósito - vista em corte	73
4.44	Movimento C11	74
4.45	Gaveta dispensadora	75
4.46	Movimento C12	75

4.47	<i>Gripper</i> C13	76
4.48	Maxila C13 e braço	77
4.49	Sistema do movimento C14	77
4.50	Movimento C14	77
4.51	Componente C2 - Mesa de elevação	78
4.52	Desfasamento entre atuadores C20 e maxilas C13	79
4.53	Pegas para barras de dimensões limite	79
4.54	Carruagem do atuador C20	80
5.1	Esquema do sistema de controlo do movimento A30	82
5.2	Esquema hidráulico do movimento A31	84
5.3	Central hidráulica	84
5.4	Esquema pneumático dos movimentos A40 e A51	86
5.5	Esquema hidráulico do movimento A50	87
5.6	Esquema hidráulico dos movimentos B20 e B30	93
5.7	Esquema hidráulico do movimento B32	96
5.8	Esquema pneumático do movimento B40	97
5.9	Esquema pneumático do movimento B41	98
5.10	Função de comando dos cilindros B41	98
5.11	Esquema pneumático do movimento B50	100
5.12	Esquema pneumático do movimento B60	102
5.13	Esquema pneumático do movimento B61	103
5.14	Deteção de ranhuras	104
5.15	Esquema hidráulico do movimento C11	107
5.16	Sensor do movimento C11	108
5.17	Esquema pneumático do movimento C12	109
5.18	Esquema pneumático do movimento C13	110
5.19	Esquema pneumático do movimento C20	112
5.20	Folha "Parâmetros e avaliação temporal"	116
5.21	Folha " <i>Grafcet</i> Principal"	117
5.22	Folha "M1"	118
5.23	Folha "M2"	119
5.24	Folha "M3"	119
5.25	Folha "M4"	120
5.26	Folha "M5"	121
5.27	Folha "M6"	122
5.28	Folha "M7"	123
5.29	Folha "M8"	123
5.30	Folha de comparação de resultados obtidos na avaliação temporal	125
A.1	Esquema pneumático - Bloco 1	136

LISTA DE FIGURAS

A.2	Esquema pneumático - Bloco 2	137
A.3	Esquema pneumático - Bloco 3	138
A.4	Esquema hidráulico	139
B.1	<i>Grafcet</i> Principal	142
B.2	<i>Grafcet</i> M1	143
B.3	<i>Grafcet</i> M2	144
B.4	<i>Grafcet</i> M3	145
B.5	<i>Grafcet</i> M4	146
B.6	<i>Grafcet</i> M5	147
B.7	<i>Grafcet</i> M6	148
B.8	<i>Grafcet</i> M7	148
B.9	<i>Grafcet</i> M8	149

Lista de Tabelas

2.1	Tempos de inserção de barras no processo original para diferentes rotores	14
3.1	Conjuntos funcionais	25
3.2	Componentes principais - Solução conceptual	27
3.3	Componentes principais do conjunto funcional A - Solução conceptual	30
3.4	Componentes principais do conjunto funcional B - Solução conceptual	35
3.5	Componentes principais do conjunto funcional B - Solução conceptual	37
4.1	Componentes principais - solução construtiva	41
4.2	Movimentos do conjunto A - solução construtiva	42
4.3	Características do acionamento A30	45
4.4	Característica do acionamento A31	46
4.5	Características do acionamento A40	48
4.6	Características do acionamento A50	48
4.7	Movimentos do conjunto B - solução construtiva	51
4.8	Características dos acionamentos B10, B11, B12 e B13	54
4.9	Características do acionamento B20	56
4.10	Características do acionamento B32	60
4.11	Sequência de movimentos da ferramenta de aperto	61
4.12	Características do atuador B40	62
4.13	Características do atuador B41	63
4.14	Características do acionamento B50	64
4.15	Característica do acionamento B51	65
4.16	Características do acionamento B60	67
4.17	Características do atuador B61	67
4.18	Características do acionamento B70	69
4.19	Movimentos do conjunto C- solução construtiva	72
4.20	Caracterização do acionamento C11	74
4.21	Características dos atuadores C12	75
4.22	Características do atuador C13	76
4.23	Características do acionamento C14	76
4.24	Características do acionamento C20	79

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Hoje em dia, a importância da automatização de processos de produção é progressivamente maior. As empresas necessitam, cada vez mais, de melhorar os seus processos de produção, de modo a manterem-se competitivas no mercado, especialmente em indústrias como a automóvel, aeroespacial e de componentes de eletrónica. Esta necessidade gera uma maior procura por máquinas automáticas que tornem os processos mais eficazes e os produtos de melhor qualidade, suspendendo o risco do erro humano pela capacidade de repetição de elementos automáticos.

O presente projeto nasce da necessidade de automatizar e melhorar um dos processos de produção de motores de média e alta tensão da empresa *WEG S.A.*. Esta automatização consiste no desenvolvimento de uma máquina automática capaz de inserir barras em rotores de tais motores.

Neste Capítulo, é inicialmente apresentada a *WEG S.A.*, seguida de um pequeno resumo sobre o trabalho realizado nesta dissertação, assim como os seus objetivos e estrutura.

1.2 Apresentação *WEG S.A.* e *WEG Portugal*

Fundada a 16 de setembro de 1961 por Werner Ricardo Voigt, Eggon João da Silva e Geraldo Werninghaus com o nome inicial de Eletromotores Jaraguá do Sul, a *WEG S.A.* (nome derivado das iniciais dos fundadores) é uma empresa multinacional brasileira com foco na construção de motores e equipamentos elétricos ligados às áreas de automação e segurança.

Sediada em Jaraguá do Sul, no estado de Santa Catarina no Brasil, a empresa possui filiais comerciais em 29 países, emprega mais de 30 000 colaboradores e exporta para mais de 110 países, com uma produção de 16 milhões de motores elétricos por ano.

Introdução

Está dividida em 5 divisões globais sendo elas :

- Motores;
- Energia;
- Automação;
- T&D (Transmissão e Distribuição);
- Tintas.

A 13 de maio de 2002, como resultado da aquisição da *Efacec Universal Motors*, a *WEG S.A.* estabeleceu-se em Portugal, especificamente na Maia, Porto. Atualmente, a *WEG Portugal* apresenta duas fábricas, representadas na Figura 1.1 [1, 2]. Uma localiza-se na Maia (WPT-MAI) e outra em Santo Tirso (WPT-STI), sendo esta última, para além de uma unidade de produção de motores elétricos, um grande armazém de produtos em curso e acabados. Estas duas fábricas cobrem uma área total de $62\,954\,m^2$, representando uma área de produção de $27\,577\,m^2$ e empregando mais de 600 colaboradores.



(a) Fábrica na Maia



(b) Fábrica em Santo Tirso

Figura 1.1 - Unidades fabris da *WEG Portugal*

A *WEG Portugal* está inserida na divisão global de "Motores", com as duas fábricas a produzir diferentes gamas de motores elétricos de indução. A fábrica da Maia tem como foco a produção de motores de indução antideflagrantes de média e alta tensão, com tensões até $11\,000\,V$ e potências até $9\,MW$, especialmente desenvolvidos para as indústrias petroquímicas, químicas, mineiras e de petróleo e de gás natural, sendo um centro de excelência e de referência mundial no desenvolvimento e fabrico desta classe de motores especiais. Oferece também serviços de instalação, manutenção e inspeção de motores. No caso da fábrica de Santo Tirso, são produzidos motores de

baixa tensão, tanto da gama normalizada como motores para aplicações especiais, incluindo motores para instalação em áreas perigosas. São também produzidos e desenvolvidos quadros elétricos até 2 MW [3].

1.3 Objetivos da dissertação

Na produção de rotores de motores elétricos de indução trifásicos de média e alta tensão de solução construtiva de rotor em curto circuito, na variante gaiola de esquilo, o induzido é realizado por barras de material condutor, usualmente cobre, alumínio ou latão, que têm de ser longitudinalmente inseridas no corpo do rotor. Em motores de grandes dimensões, este processo torna-se fisicamente difícil, moroso e extremamente desgastante, não só pelo grande número de barras a inserir, que pode chegar às dezenas, mas também pela dimensão e massa de cada uma. Potencialmente, cada barra pode atingir até 2 m de comprimento e requerer um esforço significativo para a própria inserção. Em caso de um número de ordens de produção elevado, este processo torna-se um dos maiores estrangulamentos de produção da fábrica da Maia, pois não só exige o trabalho de 2 ou 3 operários, como, sendo um trabalho desgastante a nível físico, não pode ser realizado continuamente pelos mesmos.

A máquina que se pretende conceber tem por objetivo automatizar esta fase do processo produtivo de construção de motores, cumprindo as seguintes funções:

- **Manipulação das barras** já cortadas à dimensão, a partir de uma pilha;
- **Inserção das barras** em cada uma das ranhuras previstas no rotor;
- **Compressão axial** de todo o rotor para compactação das suas chapas, que constituem o seu corpo;
- **Cravação radial** das barras, para seu ajuste mecânico às chapas que constituem o corpo do rotor, devido à folga existente entre elas.

A automatização deste processo é um dos objetivos prioritários definidos pela *WEG Portugal* para melhorar o processo de produção de motores de média e alta tensão. Apesar da diminuição dos tempos de inserção ser um parâmetro chave no desenvolvimento da máquina, o seu propósito é mais extenso. Atenuar o esforço físico e o risco dos operadores, assim como diminuir a mão de obra necessária, são os grandes benefícios da automatização deste processo.

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em 6 capítulos, que refletem o método de trabalho adotado durante a realização deste projeto.

Introdução

O Capítulo 1 é uma breve introdução desta dissertação, definindo os objetivos deste trabalho. É apresentada a empresa multinacional brasileira *WEG S.A.* e, mais em concreto, a *WEG Portugal*, empresa que propôs a realização deste projeto.

No Capítulo 2, é inicialmente feita uma breve introdução aos motores de média e alta tensão e apresentada a nomenclatura essencial utilizada no documento relativa aos componentes dos rotores. Seguidamente, é realizada uma descrição completa do problema proposto pela *WEG S.A.*, bem como do processo manual de inserção de barras em rotores, como é atualmente executado na empresa. É analisado detalhadamente este processo, identificando as exigências e especificações nele presentes. O Capítulo termina com a apresentação dos requisitos propostos pela *WEG S.A.* para serem considerados no desenvolvimento máquina.

Os Capítulos 3 e 4 abordam o desenvolvimento da solução construtiva da máquina, dividindo este processo em duas etapas: a etapa de solução conceptual e a etapa da solução construtiva. Na primeira etapa, apresentada no Capítulo 3, é inicialmente realizada uma análise aos requisitos do processo propostos pela *WEG S.A.*, de modo a obter um princípio de solução inicial para o projeto. Esse princípio de solução é descrito e caracterizado, sendo a base para toda a solução seguidamente desenvolvida. O Capítulo termina então com o conceito geral da máquina definido e apresentado. No Capítulo 4, é desenvolvido este conceito, apresentando a solução construtiva ao detalhe, caracterizando individualmente todos os movimentos e accionamentos necessários para o funcionamento da máquina. Esta descrição é fundamentada e justificada com suporte visual de todas as peças utilizadas, provenientes da modelação em *software* 3D realizada.

O Capítulo 5, incide sobre a automação da máquina. Este Capítulo descreve toda a arquitetura proposta para o comando e controlo da máquina, apresentando os circuitos de comando pneumáticos e hidráulicos e os *grafcets* comportamentais que representam o funcionamento da máquina. Neste Capítulo, é também apresentada e descrita a avaliação temporal efetuada e a sua posterior análise. Este estudo é uma simulação, realizada com o propósito de comparar o desempenho da solução obtida à solução atual utilizada e de analisar criticamente todas as soluções projetadas nos Capítulos 3 e 4.

Por último, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões finais do projeto, descrevendo de uma forma sucinta, todo o trabalho desenvolvido durante o seu período de execução. Neste Capítulo, são ainda assinalados os trabalhos futuros a realizar, servindo de base para a continuação deste trabalho, indicando pontos a melhorar e soluções a finalizar, de modo a obter um estudo completo da máquina.

Capítulo 2

Descrição do problema proposto

2.1 Introdução

Neste Capítulo, é efetuada uma breve introdução aos motores elétricos de indução de média e alta tensão, bem como uma descrição do problema proposto pela *WEG S.A.*, incluindo os requisitos necessários cumprir na automatização do processo produtivo.

É também abordado o processo atual de introdução de barras em rotores, como realizado na *WEG S.A.*, detalhando os maiores problemas que derivam desse mesmo processo, de modo a compreender as particularidades inerentes ao processo de inserção e a sua implicação nas especificações da máquina a desenvolver.

2.2 Motores elétricos de média e alta tensão

Atualmente, o papel dos motores elétricos como atuadores de aplicação universal no ambiente industrial tem vindo a aumentar exponencialmente, apresentando neste momento uma saliente importância.

Cada vez mais as indústrias mineiras e petroquímicas requerem equipamentos com maiores potências, atingindo valores impensáveis no passado como, por exemplo, os 6865 kW utilizados no triturador LYNXS, operado pela *Sims Group Ltda.* na *Associated British Ports' (ABP)* de Newport, no Reino Unido, que pode ser observado na Figura 2.1 [4].

Este notável aumento de potências implica maiores dimensões, maiores correntes e, para não se aumentar demasiado estas duas anteriores características, maiores tensões de alimentação que,

consequentemente, se traduz em problemas e desafios de produção industrial mais complexos.

Assim, a necessidade de motores elétricos de média e alta tensão está progressivamente a aumentar, desenvolvendo imensamente as vertentes industrial e académica associadas a máquinas elétricas.



Figura 2.1 - Motor WEG utilizado no triturador LYNXS

2.2.1 Motores elétricos de indução trifásicos - Princípios de funcionamento

Os motores elétricos de indução baseiam-se em 3 princípios fundamentais da física que podem ser descritos, simplificadamente, como os seguintes [5]:

- *Lei de Ampere* - Uma corrente elétrica quando atravessa um condutor cria um campo magnético, perpendicular à direção da corrente;
- *Força de Lorentz* - A interação entre um campo magnético e um condutor percorrido por uma corrente elétrica gera uma força, denominada Força de Lorentz, que atua no condutor;
- *Lei da Indução de Faraday* - Um circuito elétrico fechado, quando submetido a um campo magnético variável, cria uma força eletromotriz (FEM), também designada por EMF, do termo em inglês *electromotive force*.¹

Os motores elétricos de indução são compostos por duas partes principais, o rotor e o estator, como pode ser observado na Figura 2.2 [6], sendo o estator a parte fixa do motor e o rotor a parte rotativa.

Estator

O estator é constituído por centenas de fios de material condutor, usualmente cobre, formando 3 bobinas separadas, representadas na Figura 2.3 [7]. Estas 3 bobinas são colocadas, desfasadas de 120°, em ranhuras realizadas em chapas metálicas laminadas de elevada permeabilidade magnética. São depois alimentadas a corrente alternada trifásica, criando assim, através da *Lei de Ampere*, um campo magnético girante, como exemplificado esquematicamente na Figura 2.4 [8].

¹Uma força eletromotriz é uma diferença de potencial que tende a gerar uma corrente elétrica. É medida em V.

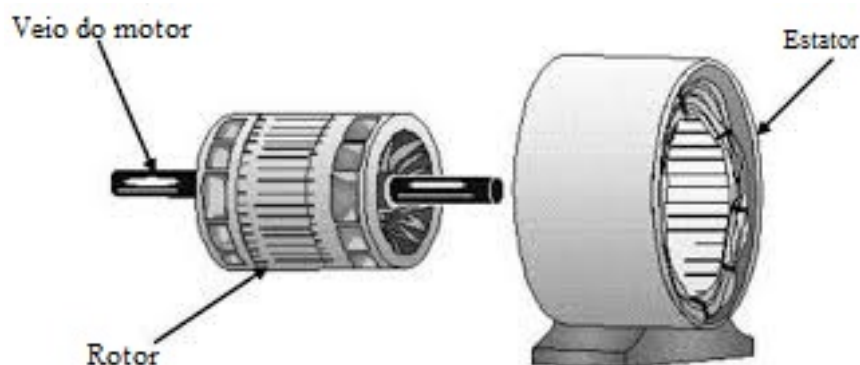


Figura 2.2 - Rotor e estator de um motor elétrico

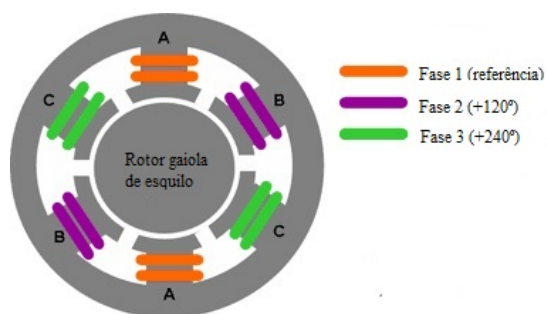


Figura 2.3 - Enrolamentos no estator

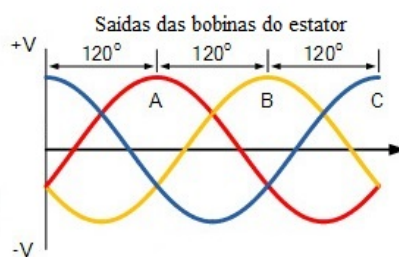


Figura 2.4 - Fases no estator

Rotor

Os rotores, nos motores elétricos de indução, são constituídos por um corpo, constituído por chapas metálicas empilhadas, muito finas, de material de grande permeabilidade magnética, pelo interior das quais passam condutores elétricos constituídos por barras. Esta construção é designada “gaiola de esquilo”, pois é composta por barras que são nos seus extremos terminadas por anéis

Descrição do problema proposto

que as interligam, realizando um curto circuito elétrico e constituindo um circuito fechado, como se pode observar na Figura 2.5 [9]. O corpo do rotor é realizado por dezenas ou até centenas de chapas empilhadas, também representadas na Figura 2.5. As chapas apresentam ranhuras para acomodar as barras, otimizando o campo eletromagnético gerado.

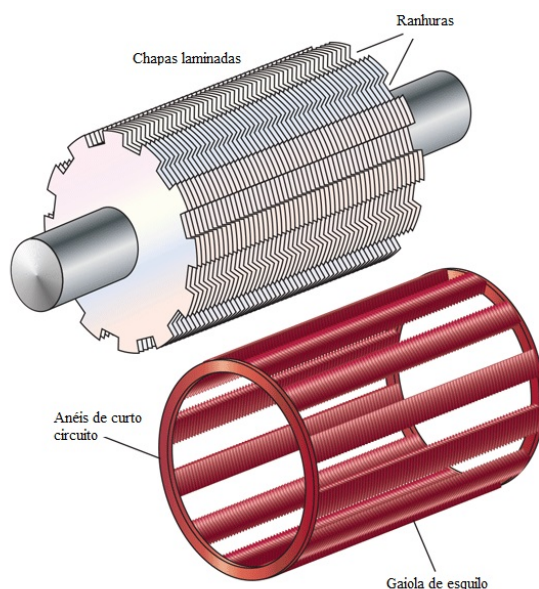


Figura 2.5 - Rotor em gaiola de esquilo

Ao colocar o rotor dentro do estator, o campo magnético gerado por este último vai, segundo a *Lei da Indução de Faraday*, induzir uma EMF nas barras do rotor, criando assim uma corrente induzida neste. Esta corrente, submetida a um campo magnético variável, gera então uma *Força de Lorentz*, em cada barra, normal à direção da corrente elétrica, que, por sua vez, se traduz num binário, fazendo o rotor girar a uma velocidade semelhante à do campo magnético girante do estator, mas menor.

2.2.2 Rotores de motores elétricos de indução de média e alta tensão

A *Força de Lorentz* nos motores de indução varia com a geometria, o volume e a densidade de corrente das barras. Maiores barras geram maiores forças e, assim, em motores para os quais seja exigido um elevado binário, as barras que constituem o rotor atingem dimensões bastante elevadas. Este é o caso verificado nos motores de média e de alta tensão para as indústrias petroquímicas e mineiras, onde são necessárias elevadas potências. Estes motores podem atingir, devido ao tamanho das barras, alturas de eixo de mais de 1 m e comprimentos superiores a 3 m, como se verifica no exemplo da Figura 2.6 [10].



Figura 2.6 - Motor elétrico de indução de alta tensão

Podem-se, então, distinguir 4 componentes essenciais nos rotores de motores de média e de alta tensão:

- **Chapas do rotor** - Chapas laminadas com cerca de 1 mm de espessura, de aço de elevada permeabilidade magnética. Estas chapas constituem o corpo do rotor. Apresentam uma geometria delicada com dois tipos de "entalhes", que podem ser observados na Figura 2.7. Os maiores são designados ranhuras das chapas do rotor e é onde são inseridas as barras do rotor. Os rasgos com menor dimensão na periferia da chapa do rotor são denominados por "rasgos das ranhuras" ou, simplesmente, "rasgos". Estes últimos só são necessários nos casos em que o rotor é constituído por barras nele inseridas, pois permitem o acesso para a cravação e bloqueio mecânico das mesmas relativamente ao corpo. Em rotores nos quais as barras são produzidas através de material vazado (por exemplo, alumínio), os rasgos das ranhuras já não são necessários.

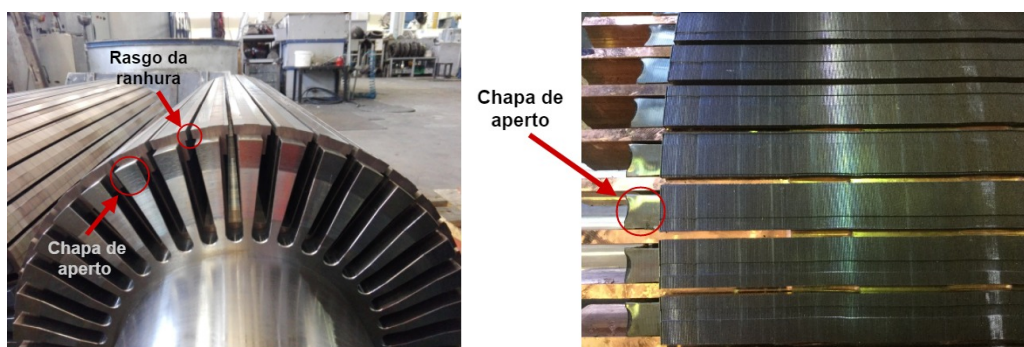


Figura 2.7 - Rasgos nas ranhuras do rotor

- **Barras do rotor** - Barras de material condutor inseridas nas ranhuras das chapas laminadas do rotor. A sua geometria e dimensão variam consideravelmente, especialmente a sua secção transversal. É por estas barras que é conduzida a corrente elétrica induzida no rotor, cujo valor é central para a definição do binário disponível no motor.

Descrição do problema proposto

- **Chapa de aperto** - Chapa, alhetada radialmente, de encosto, de bloqueio e de compactação mecânica das centenas de chapas do rotor. Cada rotor apresenta duas, uma em cada extremidade, com uma espessura entre 20 e 30 *mm*. Podem também ser observadas na Figura 2.7.
- **Anel de curto circuito** - Anéis soldados às extremidades barras do rotor, criando assim um circuito fechado. Usualmente são do mesmo material que as próprias barras.

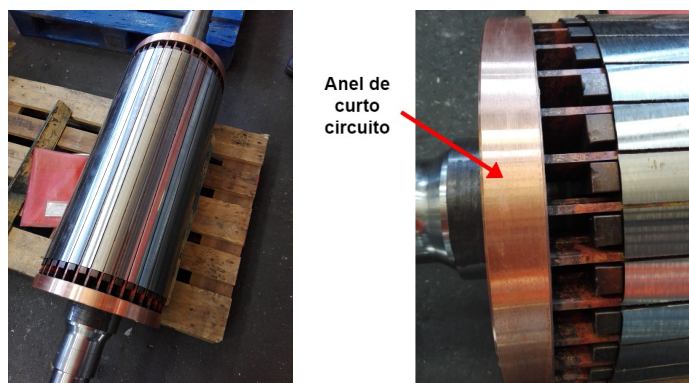


Figura 2.8 - Anéis de curto circuito do rotor

2.3 Processo de produção atual

2.3.1 Descrição do processo de produção atual

O processo de inserção de barras em rotores, atualmente realizado na fábrica da Maia, apresenta várias características, seguidamente apresentadas:

- É um processo totalmente manual;
- Requer no mínimo 2 trabalhadores;
- É um processo pouco expedito e, por isso, consumidor de tempo;
- Envolve manuseamento e movimentação de objetos com elevada massa e comprimento;
- As peças a produzir são pouco repetitivas e de elevada variabilidade dimensional;
- Apresenta baixos lotes de produção;
- As tarefas inerentes a cada processo são muito repetitivas;
- As tarefas a realizar são fisicamente desgastantes;

Este processo pode ser dividido em diversas etapas sequenciais:

- **Transporte do rotor** - O transporte é efetuado desde o local onde as chapas laminadas são inseridas no veio até ao local onde vai ser realizada a inserção das barras. Este transporte é realizado utilizando uma ponte rolante, sendo o rotor transportado na sua orientação vertical.

- **Colocação do rotor** na base de apoio – O rotor é colocado na horizontal sobre roletes de *nylon*, permitindo que o rotor rode sobre si mesmo (Figura 2.9), sob esforço manual.

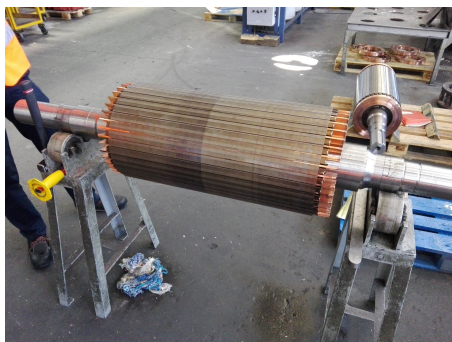


Figura 2.9 - Rotor apoiado nos roletes de nylon

- **Fixação do rotor** nos apoios - A fixação é manual, realizada por um dos trabalhadores. O rotor é bloqueado na face oposta à face de inserção, impedindo que rode sobre si mesmo durante cada inserção de barra.
- **Manipulação das barras** - As barras estão previamente empilhadas num depósito no local de inserção, já cortadas à dimensão correta e maquinadas nos extremos com um pequeno rebaixo, como se pode ver na Figura 2.10. Este rebaixo facilita a sua introdução nas ranhuras e permite aliviar as tensões internas criadas pela barra durante o processo de inserção.

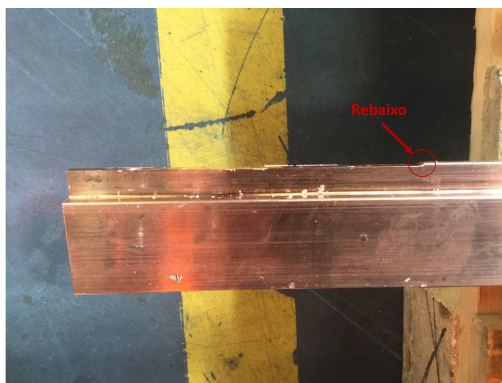


Figura 2.10 - Rebaixo maquinado no extremo da barra

- **Inserção de uma barra** - Cada barra é inserida manualmente numa das ranhuras situadas na parte mais superior do rotor. Estas posições superiores são de mais fácil acesso e correspondem à situação de uma barra retangular ser inserida na vertical e não com um ângulo menos bem definido. Foi constatado que no caso de barras e rotores de pequenas dimensões as barras são inseridas sem dificuldade. No entanto, no caso de rotores de elevado comprimento, devido aos desalinhamentos entre as múltiplas chapas laminadas que constituem o rotor, esta inserção não é realizada de modo expedito, ficando a barra por vezes

Descrição do problema proposto

encravada, batendo contra a aresta de uma chapa desalinhada (Figura 2.11). Pode utilizar-se como referência que 33% das barras entram livres sem qualquer dificuldade, 33% entram com dificuldade moderada e as restantes 33% entram com dificuldade acrescida. Nestes últimos casos, a inserção manual tem que ser ajudada, sendo utilizado um martelo pneumático com uma ferramenta de encosto adequada à secção da barra a inserir, de modo a gerar uns impulsos com choque que permitem conseguir ultrapassar estes desalinhamentos (Figura 2.12).



Figura 2.11 - Desalinhamentos nas chapas do rotor



Figura 2.12 - Ferramentas adequadas à secção da barra e martelo pneumático

- **Rotação do rotor** - A rotação do rotor tem que ser realizada manualmente, depois da inserção de uma ou mais barras na parte mais superior do rotor. É de notar que o número de barras que podem ser inseridas em ranhuras adjacentes é limitado, pois, devido ao seu peso próprio, podem criar desequilíbrios rotacionais no rotor, tornando o seu bloqueio e movimentação manual difíceis. Assim, as barras são inseridas em pequenos grupos justapostos de ranhuras, sendo depois as inserções continuadas em outros grupos de ranhuras

diametralmente opostos.

- **Ajuste axial das barras** - Finalizada a operação de inserção de todas as barras, é necessário assegurar que todas as barras estão igualmente posicionadas relativamente ao corpo do rotor, o que é feito deixando os extremos das barras a cerca de 50 mm de cada face do rotor, como exemplificado na Figura 2.13. Esta distância é necessária para, posteriormente, parte das extremidades das barras serem aparadas e ficarem em condições de serem soldadas aos anéis de curto circuito do rotor. Esta operação de “aparar” as barras é realizada num torno mecânico, sendo desbastados cerca de 5 mm em cada extremidade. Consequentemente, este processo de alinhamento das barras não exige muita precisão, mas é moroso, repetitivo e sujeito a erros.



Figura 2.13 - Barras alinhadas com extremos a 50 mm da face do rotor

- **Compressão axial das chapas do rotor** - Durante a inserção das barras pode ter ocorrido algum desvio axial das chapas laminadas, pelo que é necessário garantir que as chapas do rotor não apresentem folgas entre elas. Deste modo, as chapas do rotor são forçadas a uma compressão axial através de uma pancada, com um martelo, na periferia das chapas de aperto do rotor, tornando-o mais compacto. Essa pancada plastifica parcialmente as próprias chapas de aperto, como se pode confirmar na Figura 2.14.

- **Cravação radial das barras** - Esta operação é realizada com o objetivo de consolidar as barras com as chapas, e, portanto, o corpo do rotor. É realizada manualmente por um operador que, através de um escopro e um martelo, crava diversos pontos ao longo do comprimento de cada barra, assegurando assim que as barras ficam bloqueadas nas ranhuras do rotor. A cravação é realizada com o escopro perpendicular ao eixo do rotor, nos rasgos das ranhuras que têm entre 2 e 5 mm de largura. Para a realização desta etapa do processo produtivo é necessário fazer uma rotação incremental, para cada barra ser devidamente cravada,

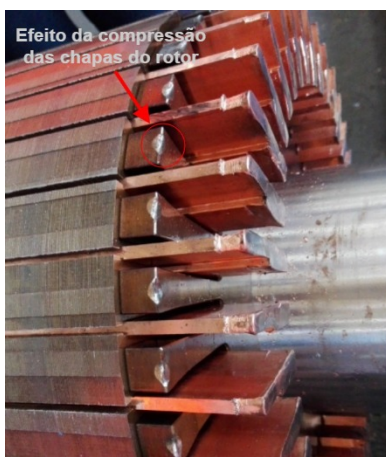


Figura 2.14 - chapas de aperto do rotor depois da compressão

até se efetuar uma rotação completa do rotor. Só deste modo se permite que o punção de cada barra seja feito na direção vertical.

- **Remoção do rotor** - Concluída a cravação de todas as barras, o processo de inserção encontra-se finalizado e o rotor é removido, através de uma ponte móvel, para a próxima estação do processo de produção, que é a operação de torneamento para aparar os extremos das barras.

2.3.2 Análise de tempos de ciclo do processo atual

Foram disponibilizados pela WEG S.A. tabelas com tempos do processo de inserção de barras medidos para diversos rotores. Com objetivo de prever as exigências temporais requeridas à máquina, estes são apresentados na Tabela 2.1 e posteriormente analisados.

Tabela 2.1 - Tempos de inserção de barras no processo original para diferentes rotores

Rotor	Setup (min)	Nº de barras	Comprimento das barras (mm)	Tempo total s/ Setup (min)	Tempo médio p/ barra (s)
Rotor 1	11	88	1100	69,3	47,25
Rotor 2	11	112	850	48	25,71
Rotor 3	11	58	690	12,5	12,93
Rotor 4	11	40	720	19,7	22,95
Rotor 5	11	112	1000	45	24,11
Rotor 6	11	40	790	25	37,50
Rotor 7	11	47	1000	33,5	42,77

Dos rotores analisados, que apenas constituem uma pequena amostra da gama de produção,

nota-se que todos apresentam o mesmo tempo de *setup*. Comparado com o tempo total para inserir as barras, esse tempo é relativamente menor, o que significa que o aumento da rapidez da inserção das barras é um dos pontos fulcrais a melhorar no processo. Da análise dos dados da tabela retira-se que o tempo médio de inserção de uma barra é de 30,46 s, tempo aparentemente curto. No entanto, é preciso lembrar que estes dados não refletem toda a gama de rotores a ser trabalhados.

É também preciso referir que na Tabela 2.1 só estão apresentados os tempos de inserção de barras, o que negligencia uma grande parte do processo completo: o alinhamento das barras, a cravação das barras e a compressão axial das chapas do rotor.

Pelo que foi possível analisar na WEG S.A. o alinhamento a 50 mm da face do rotor de todas as barras é uma tarefa delicada, consumindo bastante tempo aos operadores. Esta operação, a cravação das barras e a compressão das chapas do rotor são etapas que a máquina poderá realizar mais expeditamente que os operadores, otimizando assim o processo e diminuindo os tempos de produção.

2.4 Requisitos do processo

Para a máquina a desenvolver foram apresentados pela WEG S.A. vários requisitos geométricos, de flexibilidade e de adaptabilidade de automação a serem cumpridos, não esquecendo a inevitável modularidade requerida ao equipamento para eventuais necessidades de produção ainda não especificadas.

Assim sendo, os requisitos da máquina foram agrupados em dois tipos:

- Requisitos dimensionais - Dimensões impostas pela gama de rotores e barras a trabalhar, assim como as dimensões gerais permitidas à máquina;
- Requisitos funcionais - Funções necessárias à máquina cumprir e verificar.

2.4.1 Requisitos dimensionais

Pretende-se que a máquina seja capaz de realizar as operações na gama de rotores de diâmetro entre 380 e 660 mm. A dimensão do comprimento mínimo de um rotor é de 500 mm e, o comprimento máximo de 1500 mm. O comprimento do veio, por seu lado, varia entre 1500 e 3000 mm. O peso máximo de um rotor é de 3000 kg.

Nas Figuras 2.15 e 2.16, são apresentados 3 rotores de dimensão limite. Dois dos rotores têm o maior diâmetro, o maior comprimento de corpo e o maior comprimento de veio. A diferença entre eles está no número e na dimensão das barras a utilizar. O 3º apresenta o menor diâmetro e o menor comprimento do corpo.

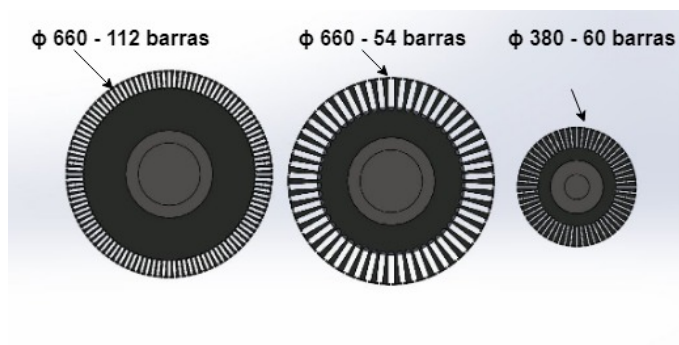


Figura 2.15 - Vista de topo dos rotores de dimensão limite

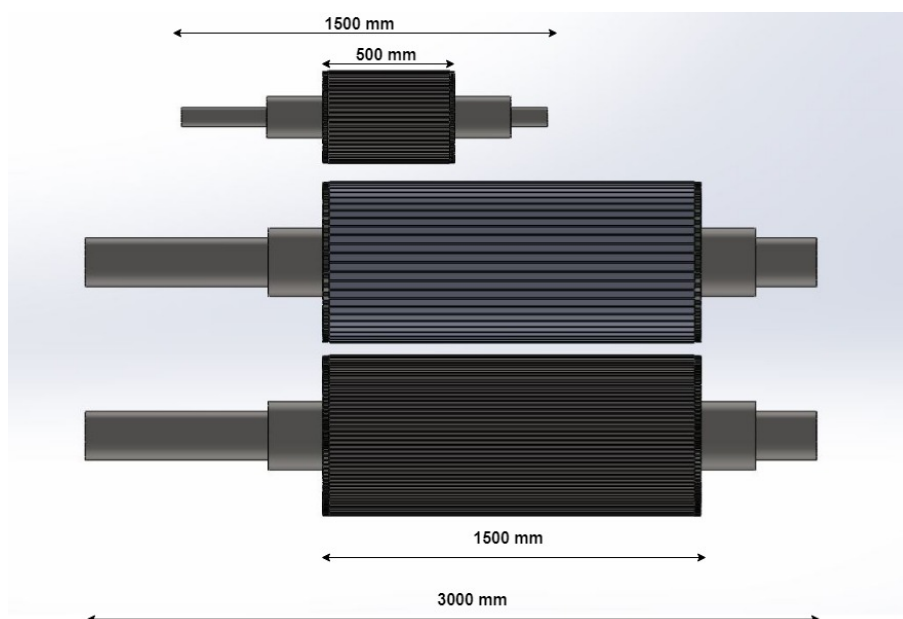


Figura 2.16 - Vista de lado dos rotores de dimensão limite

As barras podem apresentar diversas secções, sendo elas:

- (a) "Perfil" (denominação da WEG S.A.)
- (b) Circulares
- (c) Rectangulares
- (d) Trapezoidais

conforme representadas na Figura 2.17. Destas secções foram principalmente consideradas para o desenvolvimento da máquina as secções "perfil" e retangular, sendo estas as mais utilizadas pela empresa.

Relativamente às dimensões da máquina, não existem restrições espaciais a nível da área de implatação da máquina impostas pela WEG S.A., existindo somente restrições de altura, justificadas pela circulação das pontes rolantes. A altura de circulação das pontes rolantes é de 5,5 m e a altura máxima útil da fábrica é de 8,4 m.

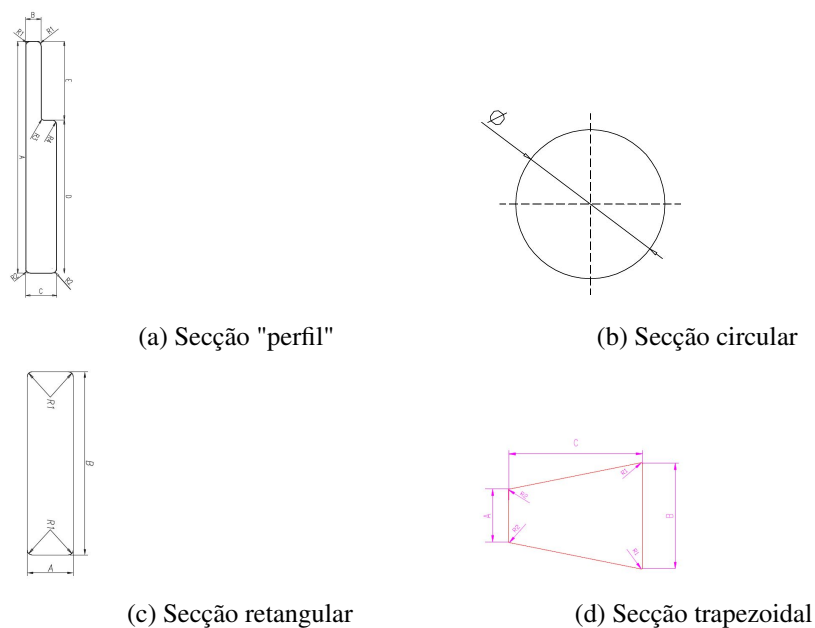


Figura 2.17 - Secções de barras

Adicionalmente, a Portaria n.º 472/2007, relativa ao transporte de máquinas, limita as dimensões máximas das mesmas sobre o transporte num camião, numa unidade, a 12 m de comprimento, 2,55 m de largura, 4 m de altura a contar do solo e 40 ton de peso bruto [11].

2.4.2 Requisitos funcionais

Através da avaliação do processo original e do *feedback* disponibilizado pela WEG S.A., tanto a nível do chão de fábrica como por parte da gestão da produção, foram identificadas diversas funcionalidades para a máquina cumprir e verificar, no âmbito da automatização eficiente do processo.

São essas funções e requisitos os seguintes:

- A máquina tem de realizar automaticamente as operações de inserção de barras, alinhamento destas, compressão das chapas do rotor e cravação radial das barras, seguindo esta ordem;
- A alimentação do lote de barras é feita a partir de uma pilha sobre uma paleta. No entanto, a alimentação "barra a barra" tem de ser automática;
- O sistema de alimentação "barra a barra" e a armazenagem das barras têm de ser soluções modulares facilmente substituíveis;

Descrição do problema proposto

- É considerada a redução dos tempos atuais de produção de um rotor para metade, como um requisito a cumprir;
- Supervisão e gestão remota do processo. A máquina tem de estar preparada para uma gestão centralizada na perspetiva de inserção num ambiente de Indústria 4.0. É, neste contexto, necessário que o envio das ordens de produção para a máquina seja realizado automaticamente a partir de software de gestão de controlo da produção, ao invés de serem introduzidas diretamente pelos operadores. Avisos de manutenção preditiva e de diagnóstico de avarias são imperativas;
- A máquina tem de cumprir os requisitos de segurança conforme especificados pela Diretiva Máquinas;
- A manipulação dos rotores até à máquina e a sua saída da máquina é manual, através de pontes rolantes instaladas na fábrica;
- O corte, maquinagem, carregamento e transporte das barras até ao local é igualmente feito por meios manuais, estando garantido o correto posicionamento e orientação das barras para a alimentação da máquina;
- A cravação radial das barras tem de ser realizada depois de todas as barras serem inseridas, não podendo realizar a inserção e cravação de uma barra consecutivamente;
- As marcações de cravação radial tanto podem configurar marcações contínuas como claramente discretas ao longo de todo o comprimento do rotor;
- No caso de rotores com perfis de ventilação entre as suas chapas, a cravação terá que ser automaticamente inibida na proximidade dessas chapas, sendo necessário que efetue "saltos de cravação" nas posições onde se encontram estes perfis. A localização dessas chapas ao longo do rotor tem de ser um parâmetro conhecido para a automatização do processo;
- A compressão axial das chapas do rotor não pode ser realizada antes de todas as barras serem inseridas, pois essa compressão diminui a folga da ranhura, impedindo que mais barras sejam inseridas;
- Não é necessário prever a existência de qualquer estação de repouso de um rotor antes, ou após, a realização do processo de inserção de barras;
- O operador só pode assumir as seguintes funções:
 - Alimentação do lote de barras;
 - *Setup* inicial da máquina;
 - Supervisão do processo.

- A máquina deverá incorporar o maior número de equipamentos de atuação, automação e segurança *WEG* possíveis e respeitar o esquema de cores *WEG*, tendo de ser sujeito a avaliação interna.

2.5 Conclusão

Neste Capítulo, foi realizada a descrição do problema proposto pela *WEG S.A.*, incluindo a descrição do processo de produção atual e a enumeração dos principais requisitos a cumprir.

Foram identificadas as várias características associadas ao processo, caracterizando-o detalhadamente. Foram destacadas as etapas de alinhamento das barras, de cravação das mesmas e da compressão das chapas do rotor como pontos também responsáveis pela extensão do processo geral, sendo tarefas eventualmente sujeitas a melhorias e otimizações. Assim sendo, a máquina a desenvolver, ao invés do que inicialmente foi ponderado, deverá ser capaz de aumentar a produtividade do processo não só através da diminuição dos tempos de inserção, mas também através da melhoria das outras etapas a ela associadas.

Os requisitos impostos pela *WEG S.A.* foram expostos, sendo divididos em requisitos dimensionais e funcionais, que obrigatoriamente têm de ser contemplados no desenvolvimento da máquina.

Foi ainda analisado um pequeno estudo, realizado pela *WEG S.A.*, sobre os tempos associados a este processo, com o objetivo de conhecer as especificações temporais e dinâmicas que a máquina terá de ser capaz de realizar.

Descrição do problema proposto

Capítulo 3

Solução conceptual

3.1 Introdução

Este projeto foi desenvolvido faseadamente, podendo ser identificadas 4 fases principais:

- Fase 1 - *Brainstorming* de ideias e conceitos, análise dos requisitos apresentados e colocação de pedidos de esclarecimento, concluindo com uma ou mais soluções conceptuais;
- Fase 2 - Desenvolvimento da solução conceptual escolhida e sua apresentação à empresa para crítica e validação;
- Fase 3 - Desenvolvimento da solução construtiva selecionada - definição da solução estrutural, dos meios e mecanismos de atuação e suas características funcionais;
- Fase 4 - Desenvolvimento da estrutura de controlo e comando da máquina (esta fase será apresentada no Capítulo 5).

Este Capítulo descreve as fases 1 e 2 do trabalho desenvolvido. Nele são expostas ideias e conceitos iniciais, é realizada a análise dos requisitos impostos pela *WEG S.A.*, e é desenvolvida a solução de princípio (conceptual) proposta para a máquina, incluindo a descrição dos componentes e movimentos necessários para cumprir os requisitos apresentados no Capítulo 2.

3.2 Análise dos requisitos do processo e princípio da solução

Após a descrição do processo atual e a apresentação dos requisitos pela *WEG S.A.*, foi realizada a sua análise, com o objetivo de compreender as necessidades inerentes à automatização do processo, iniciando assim o desenvolvimento de uma primeira solução conceptual.

Através desta análise, várias funções e especificações foram levantadas, sendo aqui expostas:

- Primeiro, de forma a responder às necessidades de modularidade e diversidade de funções da máquina, foi decidido que esta terá de ser composta, no mínimo, por dois conjuntos funcionais, os quais deverão ser independentes e trabalhar colaborativamente:
 - Inserção, alinhamento cravação e compressão axial de barras;
 - Manipulação e movimentação de alimentação das barras ao processo.
- Os rotores de mesmo diâmetro não têm sempre o mesmo número de barras nem o mesmo comprimento, estando esse número totalmente dependente do projecto elétrico que, por sua vez, é dependente dos requisitos do motor encomendado pelo cliente final. Deste modo, o número de barras a inserir e o número de ranhuras no rotor não é proporcional ao seu diâmetro, fazendo com que a máquina tenha de ser capaz de se adaptar a diferentes configurações de rotores/ranhuras.
- As ordens de fabrico não são constantes nem repetitivas, podendo variar substancialmente. Assim, é desejável que a máquina tenha um tempo de *setup* não muito elevado, de forma a otimizar a comutação de ordens de produção.
- A produção é de cadência reduzida, fazendo com que a máquina não tenha de ser pensada para trabalhar em contínuo.
- As barras têm que ser rigorosamente alinhadas com as ranhuras do rotor, existindo apenas uma pequena folga entre elas. A colocação automática de barras devidamente alinhadas a níveis de altura bastante diferentes, para a diversidade de diâmetros de rotores, coloca um desafio significativo.
- Dificuldade na introdução das barras devido ao desalinhamento das chapas do rotor. Geometricamente, pode dizer-se que existe uma folga lateral suficiente ($\pm 0,5 \text{ mm}$ folga lateral) entre os espaços nas ranhuras e as barras para que a inserção seja feita sem dificuldades. No entanto, o alinhamento dessas ranhuras entre as muitas dezenas de chapas reduz essas folgas e pode até criar interferências incontornáveis. Portanto, têm que ser previstas situações em que o movimento de inserção é particularmente fácil, e pode por isso ser rápido, mas casos existirão em que o movimento terá que ser claramente forçado e terá que ser bem mais lento, caso subsistam dificuldades na introdução. Esta alteração de condições de inserção ocorre, potencialmente mais, nos rotores que são mais compridos.
- A máquina necessita detetar e registar, para cada ranhura, se uma barra já foi anteriormente introduzida ou não.
- A máquina precisa saber o número de barras inseridas, o número de barras a inserir e as posições em que já há barras inseridas em ranhuras.

- Cada barra tem uma dimensão cerca de 100 *mm* superior à dimensão do corpo do rotor, o que significa que a sua inserção pressupõe que fique cerca de 50 *mm* protuberante em relação a cada face do rotor. É necessário, portanto, assegurar o correto posicionamento axial final de cada barra.
- As barras não podem ser inseridas em ranhuras sempre seguidas pois, devido ao seu peso, podem criar desequilíbrios rotacionais no rotor. As barras, por rotor, terão que ser inseridas em “intervalos de ranhuras” igualmente espaçados. A máquina tem de ser capaz de planear e gerir esses intervalos a preencher, dependendo do número de barras a introduzir.
- Existem barras com comprimentos de 600 a 1600 *mm*, pelo que a sua manipulação terá que ser cuidadosa e adaptável aos diferentes tamanhos.
- Tendo a posição em “cota” sido já abordada, é agora evidenciada a posição em distância da face do rotor, para diferentes dimensões de barras. Para ultrapassar esta dificuldade, entende-se que um dos extremos das barras a manipular terá que ser colocado a uma distância fixa da face do corpo do rotor.
- O rotor tem que ser devidamente apoiado (peso máximo 3 toneladas).
- Os apoios do rotor têm que se ajustar aos diferentes comprimentos de cada rotor e aos diferentes tamanhos de veios.
- A rotação do rotor tem que ser robustamente retida “ranhura a ranhura”, uma vez que ocorrerá algum esforço rotacional significativo. É necessário um sistema de deteção de ranhuras e de posicionamento com retenção mecânica robusta.
- As barras são transportadas pelo operador para a máquina, no seu conjunto ou em grupos de barras, pelo que, portanto, é necessária uma estação (capacidade) de armazenamento de barras em número adequado.
- Devido ao volume e massa dos rotores de maior dimensão, a máquina deverá permitir que estes sejam descidos na vertical a partir de um transporte por ponte rolante. Portanto, o espaço por cima da máquina terá que estar desimpedido, pelo menos na vertical do eixo de apoio do veio do rotor na máquina.
- O rotor tem que ser bloqueado axialmente e em rotação durante as operações de inserção, alinhamento, compressão e cravação. Efetivamente, o esforço eventualmente requerido em cada momento da inserção vai ter de ser equilibrado por uma reação nos apoios.
- A cravação radial das barras terá de ser rigorosamente controlada para incorporar a necessidade de zonas onde a barra não pode ser cravada, como no caso de rotores com perfis de ventilação.

3.3 Descrição da solução proposta e identificação dos conjuntos funcionais

A solução proposta baseia-se no conceito de inserção de barras com o rotor apoiado na horizontal, como na atual solução manual.

A hipótese de se realizar inserção de barras com o rotor na vertical foi também ponderada, tendo-se concluído, no entanto, que não seria uma solução prática e exequível devido aos elevados requisitos de disponibilidade em altura para acomodar barras e rotores de elevado comprimento alinhados. Ter um objeto de 3 m de altura, mesmo que colocado num fosso, iria requerer uma altura adicional de cerca 2 m para as barras a inserir, passando a ser uma solução com mais de 5 m de altura. Isto traria consequências delicadas, tanto a nível funcional e construtivo, como a nível das limitações dimensionais impostas pela fábrica. Foi analisada ainda a possibilidade de todo o rotor ser inserido num fosso. Contudo, isso obrigaria à utilização de uma grande área de trabalho que pode facilmente ser evitada pela solução de inserção na horizontal. A solução horizontal coincide também com o que é realizado atualmente na WEG S.A., podendo assim adaptar muitos dos conceitos e ideias já utilizadas.

Estando o rotor na horizontal, as barras podem ser inseridas na ranhura mais superior, caso o rotor esteja apoiado em apoios fixos ao solo, ou na ranhura mais inferior, caso o rotor esteja suspenso. É adotada a solução de inserção na ranhura mais superior, por questões de maior facilidade do apoio do rotor, de maior segurança e certamente de maior semelhança com o processo atual.

Assim, é definido que o princípio da solução a desenvolver envolve a inserção das barras à cota máxima do rotor, com este apoiado na horizontal.

3.3.1 Identificação dos conjuntos funcionais

No ponto 3.2 foi reconhecido que a solução deve apresentar, no mínimo, dois conjuntos funcionais independentes, com o objetivo de desenvolver uma solução modular e flexível, caso haja necessidade de alterações futuras, quer seja devido à crescente expansão da gama de motores a fabricar, quer venham a existir novas especificações aqui não mencionadas.

Foram então definidos os dois conjuntos funcionais, baseados nos princípios anteriormente expostos, que representam as funções a contemplar neste projeto. A estas soluções adicionou-se a solução estrutural de suporte global da máquina e do rotor a trabalhar, à qual foram atribuídas características específicas funcionais essenciais.

Foi elaborado um esboço conceptual da máquina apresentado na Figura 3.1, sem o rotor a ser trabalhado, e na Figura 3.2, com um rotor de dimensão máxima em posição de trabalho.

Os conjuntos funcionais foram identificados e tabelados na Tabela 3.1. Para maior facilidade de compreensão foi atribuído um código de cores a cada conjunto, representado tanto na Tabela como nas Figuras.

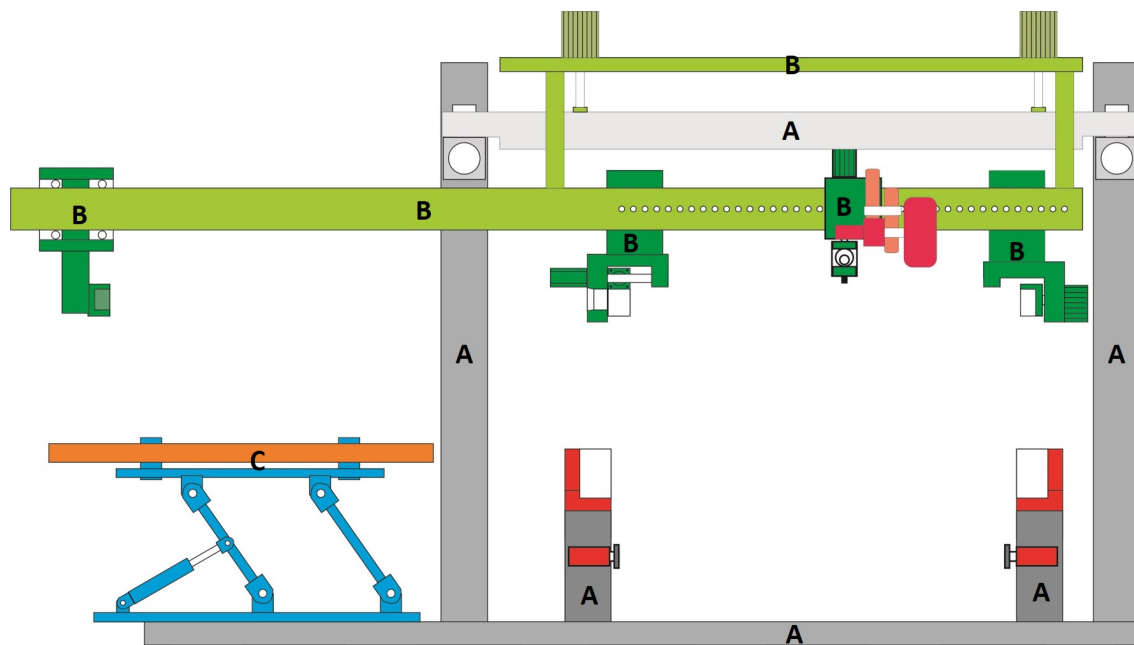


Figura 3.1 - Esquema da solução inicial proposta com os conjuntos funcionais identificados

Tabela 3.1 - Conjuntos funcionais

Conjuntos funcionais	
Conjunto A	Estrutura de suporte
Conjunto B	Ferramenta de manipulação
Conjunto C	Módulo de alimentação das barras

Cada um destes conjuntos compreende diversos componentes que, entre eles, partilham as várias funções da máquina. Generalizando, e para uma primeira compreensão da solução proposta, podem-se definir as principais funções de cada conjunto funcional como as seguintes:

- **Conjunto A** - Este conjunto representa os componentes de suporte estrutural da máquina. Está encarregue de assegurar a acomodação/localização do rotor na máquina e de suportar os conjuntos funcionais B e C;
- **Conjunto B** - Este conjunto está encarregue de realizar as funções que englobem a interação entre o rotor e as barras, nomeadamente a inserção de barras, a rotação do rotor, a compressão axial das chapas laminadas do rotor e o alinhamento e a cravação radial das barras. Esta ferramenta está localizada num nível superior ao do rotor, de modo a permitir a inserção das barras na sua ranhura mais superior;
- **Conjunto C** - Este conjunto é encarregue do armazenamento das barras e a sua alimentação à máquina. Realiza as funções de manipulação e movimentação de uma barra a partir

de uma pilha, garantindo o seu correto posicionamento relativamente à ranhura onde vai ser inserida e transportando-a até ao conjunto funcional B.

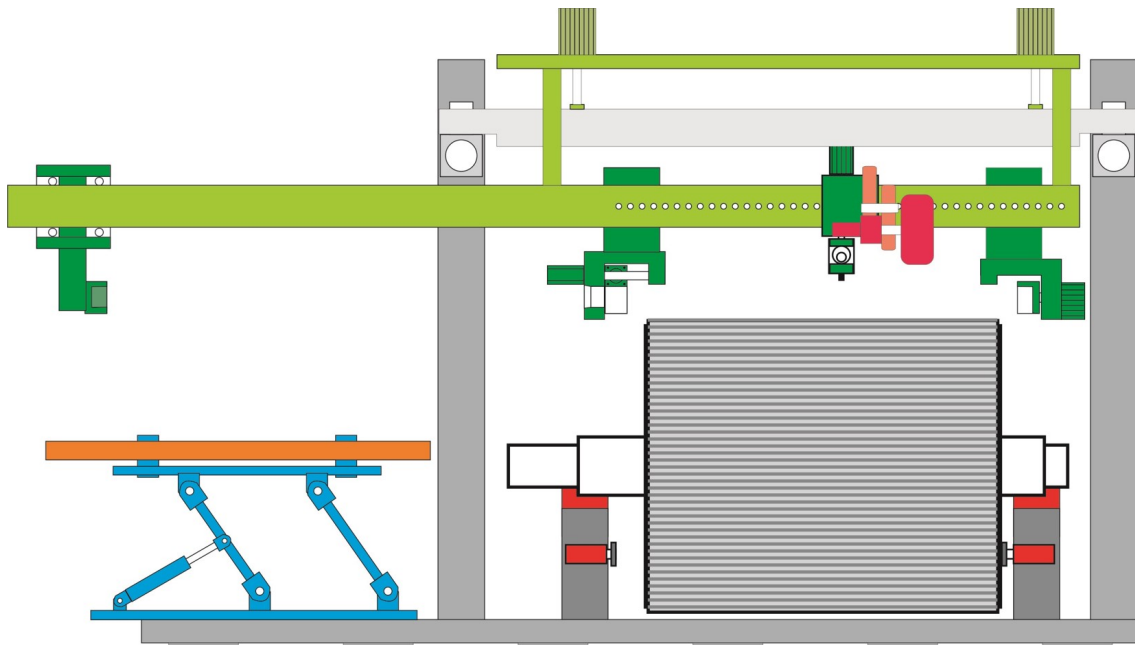


Figura 3.2 - Esquema da solução inicial proposta com um rotor de dimensão máxima em posição de trabalho

Após a identificação destes conjuntos funcionais, é realizada uma descrição conceptual de todas as funções a cumprir por cada conjunto funcional, para plena compreensão da solução proposta.

3.4 Descrição e caracterização conceptual dos conjuntos funcionais

Nesta secção, é apresentada uma descrição justificada dos componentes e dos movimentos, a nível conceptual, para cada conjunto funcional previamente identificado. Para simplificação da leitura, os componentes e os seus respetivos movimentos são tabelados e codificados.

Na Tabela 3.2 são apresentados os componentes principais da solução conceptual escolhida, com o respetivo código, e agrupados por conjunto funcional.

3.4.1 Conjunto A - Estrutura de suporte

Este é o conjunto de suporte estrutural da máquina, de acomodação e de localização do rotor.

Tabela 3.2 - Componentes principais - Solução conceptual

Componentes principais	
Código	Nome do componente
Conjunto A	Estrutura de suporte
A1	Base
A2	Estrutura porticada
A3	Viga de interligação
A4	Apoio fixo do rotor
A5	Apoio móvel do rotor
Conjunto B	Ferramenta de manipulação
B1	Grampo móvel
B2	Grampo fixo
B3	Carruagem de cravação
B4	Roda de fricção
B5	Esbarro móvel
Conjunto C	Módulo de alimentação das barras
C1	Depósito de barras
C2	Mesa de elevação das barras

Para cumprir as especificações apresentadas no Capítulo 2, este conjunto tem de assegurar os seguintes requisitos:

- (i) Suportar todos os conjuntos funcionais incluídos na máquina, bem como os produtos a trabalhar, nomeadamente, os rotores e as barras;
- (ii) Permitir o acesso à máquina dos produtos a trabalhar, nomeadamente dos rotores, com alimentação e remoção vertical, e das barras com alimentação em pilha, por palete;
- (iii) Assegurar a localização perfeita do rotor na máquina de modo a constituir uma referência de posição fiável do rotor, para todas as ações associadas à de inserção de barras;
- (iv) Permitir o suporte, a um nível superior do que a cota de trabalho, do conjunto funcional B, da “ferramenta de manipulação”, bem como a sua movimentação global, de modo a assegurar o alinhamento perfeito das barras a serem inseridas nas ranhuras do rotor;
- (v) O bloqueio rotacional e axial do rotor durante todo o processo, excluindo na etapa de rotação.

Seguidamente, são apresentados e justificados os componentes deste conjunto funcional. Estes, como observados na Figura 3.3, são:

- Base;
- Estrutura porticada;
- Viga de interligação;
- Apoio fixo do rotor;
- Apoio móvel do rotor.

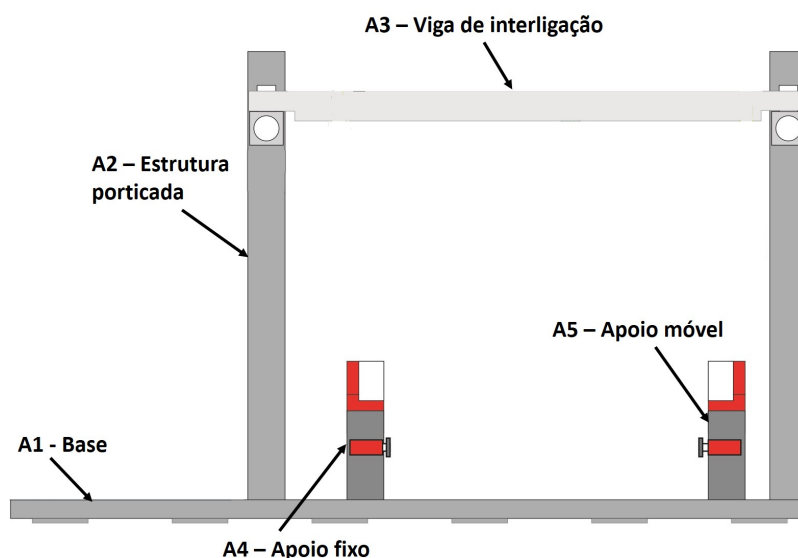


Figura 3.3 - Componentes do conjunto funcional A

Componente A1 - Base:

O componente A1 é a base estrutural de toda a máquina. Nela vão estar assentes todos os outros conjuntos funcionais e os produtos a trabalhar necessitando, portanto, de ser robusta para aguentar com todo o peso das partes.

Esta base contém duas secções diferentes, separadas pelas colunas da estrutura porticada. A secção entre colunas é a secção que vai acomodar o rotor e a ferramenta de manipulação (conjunto funcional B). Esta é, assim, a secção principal onde os trabalhos irão ter lugar. A secção exterior, à esquerda, é onde vai ser colocada a solução pretendida para a alimentação e manipulação de barras (conjunto funcional C). Esta secção apresenta um acesso facilitado para a abastecimento das barras em pilha no sistema.

Componente A2 - Estrutura porticada:

A ferramenta de manipulação tem que se posicionar sobre o rotor, alinhada com o plano vertical que inclui o centro do veio do rotor. Por essa razão, a ferramenta de manipulação tem que ser estruturalmente suportada a partir de um nível superior, o que justifica a existência de uma estrutura porticada para o seu suporte.

A estrutura porticada é composta por 4 colunas que vão suportar todo o peso da ferramenta de manipulação. No entanto, esta estrutura porticada não pode ser fechada superiormente, pois tem que permitir o acesso do rotor de maior dimensão ao interior da máquina. Assim, o pórtico não é fechado para permitir este acesso.

Componente A3 - Viga de interligação:

A viga de interligação é a viga que suporta a ferramenta de manipulação (conjunto funcional B). Para permitir o perfeito alinhamento da ferramenta de manipulação com a ranhura do rotor onde vai ser inserida uma barra, a viga de interligação está apoiada nos seus extremos em carruagens de movimentação horizontal sobre os montantes da estrutura porticada (componente A2). Cada montante permite o movimento horizontal da viga para uma posição fixa extrema para que esta não impeça a colocação nem a remoção de um rotor na máquina. (O rotor será movido na vertical da máquina, através de uma ponte móvel externa). Em posição de trabalho, esta viga irá transladar até ficar rigorosamente no plano que contém o eixo do rotor, garantindo a complanidade entre a ferramenta de manipulação e o centro de rotação do rotor.

A viga de interligação possui também o movimento vertical utilizado para subir a ferramenta de manipulação. Esse movimento de descida é efetuado até os batentes que existem nos grampos atingirem o rotor (ver conjunto funcional B), permitindo, assim, o correto posicionamento da ferramenta de manipulação em relação ao rotor.

Componentes A4 e A5 - Apoios do rotor

A posição de trabalho do rotor é garantida através de dois suportes fixos na direção transversal relativa ao eixo do rotor, sendo um deles móvel longitudinalmente, ajustando-se ao comprimento do rotor a trabalhar.

Os apoios do rotor são constituídos por um montante fixo à base (componente A4), do lado esquerdo da estrutura, e por um montante móvel (componente A5) ajustável à dimensão longitudinal de cada rotor. Com o rotor na horizontal, surge imediatamente o problema da cota a que é realizada a inserção de barras pois, devido aos diferentes diâmetros possíveis, esta vai variar consideravelmente. Para contornar este problema foi previsto que a localização em altura dos apoios onde o rotor é pousado tenha de compensar as diferenças de diâmetro dos rotores, deixando o extremo superior dos mesmos sempre à mesma cota, e portanto, fazendo com que o curso de descida da ferramenta de manipulação não varie consideravelmente. Assim, cada um destes montantes é constituído por uma parte inferior que é permanente, e uma parte superior cujas dimensões e forma são ajustadas a cada tipo de rotor. As partes superiores dos apoios devem ser bem lubrificadas, de forma a permitir a rotação do rotor sem danificar o veio, ou então revestidos com um material antifricção na superfície de apoio.

O bloqueio rotacional e axial do rotor é também assegurado por estes componentes, por intermédio de um cilindro pneumático na base de cada apoio, que encostará às faces do rotor, bloqueando-o em rotação.

A translação do apoio móvel é o movimento de ajuste dos apoios à dimensão longitudinal do rotor. Este apoio move-se sobre umas guias lineares e necessita de uma força não desprezável para conseguir apertar o rotor e “encaixar” os veios nos seus apoios. Para isso, pressupõe-se a utilização de um cilindro hidráulico neste movimento.

Assim, através dos componentes previamente descritos, os requisitos inicialmente especificados para este conjunto são cumpridos, sendo resumidos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Componentes principais do conjunto funcional A - Solução conceptual

Conjunto A		
Código	Nome do componente	Funções
A1	Base	Base estrutural
A2	Estrutura porticada	Suporte do conjunto funcional B
A3	Viga de interligação	Movimentação do conjunto funcional B
A4	Apoio fixo do rotor	Acomodação, localização e bloqueio do rotor
A5	Apoio móvel do rotor	Acomodação, localização e bloqueio do rotor

3.4.2 Conjunto B - Ferramenta de manipulação

Este conjunto está encarregue de realizar a maioria das funções previstas pela máquina, nomeadamente a inserção das barras, a compressão axial das chapas do rotor e cravação das barras. Realiza também a rotação do rotor sobre o seu eixo.

Os requisitos a cumprir por este conjunto funcional são os seguintes:

- (i) Movimento de inserção rápida de barras, para os casos em que esta operação não ofereça resistência;
- (ii) Movimento de inserção forçada de barras, para os casos em que a capacidade de inserção rápida já não é possível;
- (iii) Apoio da ferramenta de manipulação sobre o rotor;
- (iv) Rotação "ranhura a ranhura" do rotor;
- (v) Movimentação das barras recebidas do conjunto funcional C;
- (vi) Compressão axial das chapas laminadas do rotor;
- (vii) Cravação radial das barras, e alinhamento destas a 50 mm da face do rotor.

Este conjunto funcional é constituído por uma viga, que suporta diversas carruagens com todas as ferramentas necessárias para executar estas operações, como se pode observar na Figura 3.4. Nela estão identificados os seus componentes. Esta viga pode deslocar-se na horizontal, transladando de uma ponta à outra da máquina, permitindo que o rotor seja colocado na máquina. Pode também deslocar-se na vertical, de modo a permitir o seu desencosto da superfície superior do rotor. Estes movimentos são assegurados pelo conjunto funcional A, como anteriormente referido.

Cada carruagem apresenta um propósito específico, podendo a maioria deslocar-se ao longo da ferramenta de manipulação. Assim sendo, as carruagens são sempre capazes de se adaptarem às diferentes dimensões de rotores.

As carruagens são as seguintes:

- Carruagem do grampo fixo;
- Carruagem do grampo móvel;
- Carruagem de cravação;
- Carruagem do esbarro móvel.

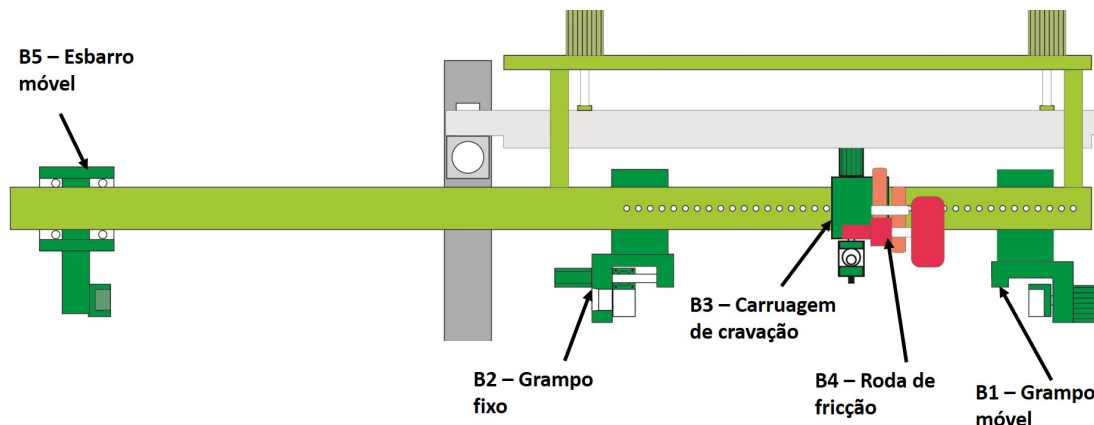


Figura 3.4 - Esquema da ferramenta de manipulação

Componente B1 - Grampo móvel:

Os grampos são ferramentas complexas que possuem como principal objectivo a compressão axial das chapas laminadas do rotor. Esta compressão necessita ser realizada na zona alhetada da chapa de aperto do rotor, apresentando por isso uma pequena área de atuação, entre 5 e 10 mm de largura, dependendo do rotor. É também exigido que estes grampos, durante a compressão, não interfiram com as barras já inseridas no rotor, que se encontram 50 mm pretuberantes da face do rotor.

Assim, a peça de compressão do rotor deve apresentar uma forma em U invertido, e ser estreita para não interferir com as barras. Deve ainda ter a face das abas ligeiramente inclinada para melhorar o efeito de compressão, permitindo que haja contacto mais localizado com a chapa de aperto. Pelo seu rasgo interior passa a barra a inserir e, portanto, tem que ser uma peça específica para diferentes barras a inserir, havendo a necessidade de serem facilmente substituídas.

Para permitir o apoio da ferramenta de manipulação na superfície do rotor existem, também nestas duas carruagens, uns batentes, denominados batentes de apoio no rotor. Os batentes, além de garantirem o apoio da ferramenta de manipulação no rotor, exigem que a descida desta seja realizada graviticamente até que haja contacto entre os batentes e a superfície superior do rotor, tornando não necessário um controlo mais complexo na descida da ferramenta de manipulação.

O movimento de compressão das chapas é idêntico no caso do grampo móvel e no grampo fixo. São movimentos simultâneos, de curso reduzido, mas que devem apresentar uma capacidade

de força considerável, tendo de ser o suficiente para equivaler a uma pancada impulsiva de martelo realizada por ação humana.

O grampo móvel está colocado no lado direito da ferramenta de manipulação, que é o lado contrário à face por onde vão ser inseridas as barras. Para se ajustar aos diferentes comprimentos do rotor, este grampo move-se na horizontal, ao longo da ferramenta de manipulação.

O grampo móvel também é responsável pelo alinhamento longitudinal das barras. Deste modo, existe um batente que garante que as barras, quando saem pela face oposta da sua inserção, ficam a 50 mm dessa mesma face. Assim, elimina-se a etapa de alinhar as barras todas depois de todas serem inseridas, diminuindo consideravelmente o erro de alinhamento e o tempo de inserção. A deteção da barra no batente do grampo da esquerda é feita quando um pino metálico, forçado por uma mola, é empurrado pela barra. O outro extremo desse pino é detetado por um detetor indutivo, como esquematizado na Figura 3.5.

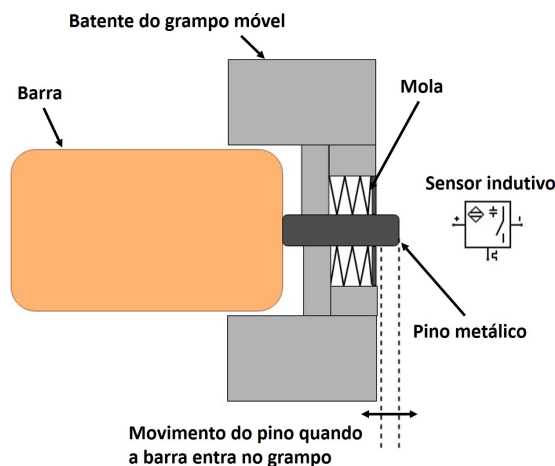


Figura 3.5 - Esquema da deteção da barra no grampo móvel

Componente B2 - Grampo fixo:

O grampo fixo, oposto ao grampo móvel, além das funções anteriormente descritas, está também encarregue do guiamento das barras e da inserção forçada da barra através de avanços incrementais. Ao contrário do grampo móvel, não apresenta um batente para posicionamento das barras.

O guiamento da barra é conseguido através de uma peça apropriada ao tipo de secção e dimensão da barra, colocada no extremo mais à esquerda do grampo que, à semelhança da peça de compressão nos grampos, pode facilmente ser substituível.

A inserção forçada da barra é realizada através de avanços incrementais, forçando a barra a ultrapassar os eventuais desalinhamentos de chapas do rotor. Esta inserção é conseguida através

de movimentos combinados de aperto lateral da barra e avanço da barra. A inserção forçada inicia-se quando se verificar uma resistência elevada à inserção rápida, ou quando esta termina, tendo percorrido todo o seu curso.

No caso do movimento de avanço da barra, este é realizado pelo mesmo atuador que realiza o movimento de compressão axial das chapas do rotor, sendo as únicas diferenças o momento em que este é realizado, a força necessária e a não simultaneidade com o movimento idêntico do grampo móvel. Consequentemente, na fase de inserção incremental da barra, só o grampo da direita é que está encostado à face do rotor. Relativamente à força necessária para forçar a inserção da barra, prevê-se que esta seja superior à força necessária para comprimir as chapas do rotor, aumentando assim a capacidade mínima requerida a este atuador.

O movimento de aperto lateral das barras é obtido através de um mecanismo constituído por um cilindro hidráulico de simples efeito com tirantes que, estando atuado, prende a barra através de uma ferramenta própria. Esta é também adaptada a cada secção de barra.

Componente B3 - Carruagem de cravação

De modo a cravar as barras do rotor, como especificado anteriormente, existe uma carruagem, denominada carruagem de cravação, que contém um punção. Esta cravação ocorre ao longo de todo o comprimento do rotor e, portanto, a carruagem de cravação necessita de se mover horizontalmente ao longo da ferramenta de manipulação, à semelhança do grampo móvel. Este movimento requer controlo de posição em malha fechada para conseguir cumprir o requisito de cravação em rotores com perfis de ventilação, efetuando os necessários "saltos de cravação". A carruagem de cravação está contida entre os dois grampos, limitando assim o seu curso aos extremos do comprimento do rotor.

Para aproximar o punção da superfície a cravar, a carruagem precisa de um movimento vertical de aproximação. Este é um movimento relativamente lento, mas que necessita de uma certa capacidade de força, para contrariar as forças de reação criadas pelo punção no movimento de cravação.

Finalmente, o movimento alternado de subida e descida do punção que vai cravar as barras é realizado por uma cabeça de percussão com roda excêntrica, accionada por um motor elétrico, tendo o punção de ser pequeno o suficiente para conseguir penetrar nos rasgos das ranhuras (entre 2 a 5 mm).

Acoplado à carruagem de cravação existe também o pino de posicionamento, que vai realizar a deteção das ranhuras do rotor, garantindo assim a rotação do rotor "ranhura a ranhura", como especificado. Este pino é constituído por um rolete, uma mola e um sensor indutivo. Quando o rotor se encontra em rotação, a ferramenta de manipulação encontra-se subida e o rolete está pousado na superfície superior do rotor, sendo isso alcançado através de um movimento vertical

do pino de posicionamento.

O rolete tem a mesma orientação do rotor, sendo as suas faces paralelas às faces do mesmo. Assim, quando o rotor rodar, o rolete acompanha a rotação. Sempre que uma ranhura for ultrapassada há uma pequena variação de posição do pino de posicionamento, devido à diferença de alturas entre a ranhura e o diâmetro externo das chapas do rotor. A variação é detetada pelo sensor indutivo, conseguindo-se assim identificar a posição das ranhuras do rotor. Esta deteção baseia-se no princípio de funcionamento de um pino de roquete.

Componente B4 - Roda de fricção

Este componente é responsável pela rotação do rotor, operação essencial para a inserção de barras em todas as ranhuras do rotor.

Em consequência da solução escolhida para o apoio da ferramenta de manipulação sobre o rotor, a rotação do rotor tem de ser realizada com a ferramenta elevada, para não existir interferência entre os batentes do rotor, os grampos e o próprio rotor. Esta exigência acaba por ser vantajosa, pois permite que a rotação do rotor e manipulação das barras ocorram simultaneamente.

Devido à diferente gama de diâmetros de rotor e de veios, uma solução que impusesse a rotação direta no eixo de rotação do rotor não foi admitida como viável, pois o eixo do rotor não tem posição definida, em cota. Assim, a rotação aplicada na superfície externa do rotor através de uma roda de fricção foi a solução escolhida.

Também devido à variabilidade dos diâmetros, é proposto que a roda de fricção actue na superfície superior do rotor, ao invés da superfície inferior, pois deste modo pode ser colocada na ferramenta de manipulação, sendo o curso a percorrer para atingir o rotor muito menor, pois a cota superior de trabalho é sempre a mesma. Tendo definido este conceito, a roda de fricção é fixa num dos lados da carruagem de cravação.

A roda de fricção apresenta, então, dois movimentos: um movimento de encosto à superfície do rotor e o movimento de rotação.

O encosto entre a roda de fricção e o rotor não é realizado na superfície exterior mais elevada do mesmo. É imediatamente destacado que esta condição seria praticamente impossível de realizar devido ao provável elevado tamanho da roda e ao reduzido espaço disponível entre a ferramenta de manipulação e a superfície do rotor. Assim, o ataque da roda de fricção à superfície do rotor tem de ser realizado pela lateral, condição cumprida através da utilização de um sistema de alavanca atuado por um atuador linear, provavelmente pneumático.

O movimento de rotação é atuado por um motor elétrico de indução acoplado a um redutor. Eventualmente, pode ser utilizado um servomotor, em substituição do motor, caso as necessidades de controlo da velocidade da roda se revelem exigentes.

Componente B5 - Esbarro móvel

A inserção rápida da barra e a sua movimentação, desde o conjunto funcional C até ao grampo fixo, é garantida pelo esbarro móvel.

Este esbarro móvel encontra-se no extremo esquerdo da ferramenta de manipulação, associado a uma carruagem idêntica à do grampo móvel, que se pode deslocar até ao grampo fixo.

O esbarro possui uma peça substituível adequada à secção da barra a manipular e um sistema de deteção de barra semelhante ao existente no grampo móvel.

A inserção rápida da barra no rotor é assegurada pelo movimento horizontal da sua carruagem, que é realizado até atingir o grampo fixo (totalidade do curso), ou até encontrar oposição elevada na inserção, momento em que se inicia o movimento de inserção forçada.

Os componentes previamente descritos cumprem, assim, as funcionalidades e especificações definidas para este conjunto funcional. Estes estão resumidos na Tabela 3.4, assim como as suas funções principais.

Tabela 3.4 - Componentes principais do conjunto funcional B - Solução conceptual

Conjunto B		
Código	Nome do componente	Funções
B1	Grampo móvel	Compressão axial, alinhamento das barras, apoio da ferramenta de manipulação
B2	Grampo fixo	Compressão axial, apoio da ferramenta de manipulação, inserção forçada da barra, guiamento da barra
B3	Carruagem de cravação	Cravação radial das barras, controlo da rotação do rotor
B4	Roda de fricção	Rotação do rotor
B5	Esbarro móvel	Inserção rápida da barra, movimentação da barra desde o conjunto C

3.4.3 Conjunto C - Módulo de alimentação das barras

Este conjunto é responsável pelo armazenamento das barras, antes de serem inseridas, e pela sua alimentação à máquina. É o conjunto mais modular dos 3, podendo facilmente ser substituído por outra solução, caso seja necessário.

A este conjunto são exigidos os seguintes requisitos:

- (i) Modularidade da solução;
- (ii) Armazenamento das barras em lote;
- (iii) Separação individual de barras provenientes de uma pilha;
- (iv) Posicionamento rigoroso da barra alinhada com a ranhura onde esta vai ser inserida;

Solução conceptual

- (v) Movimentação das barras desde o depósito até ao esbarro móvel;
- (vi) Posicionamento da barra à cota de inserção;
- (vii) Manipulação de barras adaptada aos diferentes tipos de secção.

Os componentes definidos para este conjunto funcional são:

- Depósito das barras;
- Mesa de elevação.

e são seguidamente caracterizados e justificados.

Um esboço da mesa de elevação pode ser observado na Figura 3.6.

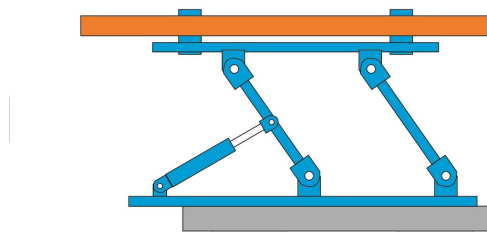


Figura 3.6 - Esquema da mesa de elevação

Componente C1 - Depósito das barras

O depósito é onde são colocadas as barras com os extremos já maquinados, cortadas e orientadas corretamente, prontas a serem inseridas. Daí são manipuladas até à mesa de elevação que está encarregue de as elevar até à cota de inserção, para poderem ser manipuladas pelo esbarro.

É uma estrutura com alguma inclinação onde as barras descem por gravidade. A separação individual das barras é garantida por um batente, no final do depósito, que só abrirá sempre que for necessária uma barra. Para abrir, o batente subirá para uma calha posicionada por cima do batente, através da atuação de um cilindro de simples efeito, semelhante ao mecanismo de um portão. O depósito está o mais junto possível do montante esquerdo da estrutura porticada, garantindo que cada barra é sempre manipulada com uma das extremidades numa linha vertical fixa, independentemente do tamanho da barra.

Componente C2 - Mesa de elevação

O correto posicionamento em cota, o alinhamento com a ranhura e a movimentação da barra são garantidos pelo componente C2, a mesa de elevação. Esta é uma mesa basculante, em forma

de paralelogramo, movida por um cilindro que desloca um dos lados do paralelogramo. Existem dois apoios no plano médio do tampo da mesa, que suportam as barras, sendo um deles ajustável horizontalmente, para se ajustar ao comprimento de todos os tipos de barras. Estes apoios contêm umas pegas que são ajustáveis à secção da barra e à sua largura, podendo ser substituídos.

Esta mesa encontra-se fixa, com o seu plano intermédio alinhado com o plano intermédio dos apoios do rotor, assegurando assim o alinhamento da barra e da ranhura que se encontra na vertical.

Ao avançar o cilindro da mesa de elevação, esta bascula, elevando a barra à altura exata de inserção. Ao utilizar uma solução de paralelogramo, é garantida não só a manutenção do paralelismo do movimento, o alcance sempre da mesma posição vertical final, e ainda a aproximação horizontal da barra à guia do grampo fixo, facilitando a introdução da barra neste componente.

Estes componentes estão fixos numa base externa à base da máquina, permitindo assim a sua fácil remoção, deixando a sua área de ocupação livre para outra eventual solução, garantindo a modularidade do conjunto funcional C.

Assim fica descrita a solução conceptual do conjunto funcional C. Os seus componentes e respetivas funções estão apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Componentes principais do conjunto funcional B - Solução conceptual

Código	Nome do componente	Funções
C1	Depósito de barras	Armazenamento e separação das barras
C2	Mesa de elevação das barras	Posicionamento e movimentação das barras

3.4.4 Reconfigurações da máquina

A enorme flexibilidade exigida à máquina, devido à larga amplitude de diâmetros de rotores a trabalhar, requer uma significativa personalização de ferramentas. É então necessário reconfigurar a máquina e algumas das suas peças sempre que um novo rotor tenha de ser trabalhado.

Como anteriormente visto, existe também uma necessidade de peças adaptadas aos diferentes perfis e tamanhos de barras existentes. Apesar de já mencionadas, estas peças são agora listadas:

- As peças superiores dos apoios do rotor;
- Ferramentas de compressão nos grampos;
- Peças dos batentes do rotor na ferramenta de manipulação. Estas peças têm de ser adaptadas ao diâmetro do rotor a trabalhar, de modo a garantir um apoio estável da ferramenta de manipulação;
- Ferramenta encarregue de apertar a barra no movimento B22 de inserção forçada;
- Ferramenta de guiamento do esbarro móvel e do grampo fixo;

- Apoios das barras na mesa de elevação.

A existência de peças reconfiguráveis diminui a estimativa do custo da máquina, pois evita a utilização de soluções mais complexas e adaptáveis. Ao mesmo tempo, pode levar a um aumentado tempo de *setup* da máquina, parâmetro que se pretende curto.

Portanto, na fase de desenvolvimento da solução construtiva da máquina, tem de ser realizado uma avaliação temporal da máquina e, se necessário, diminuir o número de peças configuráveis através da aplicação de servomecanismos, aumentando assim o custo da máquina, mas obtendo melhores tempos de *setup*.

3.5 Conclusão

Neste Capítulo, foi realizada a descrição e caracterização da solução conceptual inicialmente escolhida, terminado assim a fase 1 e 2 do presente projeto.

Inicialmente, no subcapítulo 3.2, foi efetuada uma análise detalhada dos requisitos inicialmente impostos pela *WEG S.A.*, assim como a apreciação das principais características necessárias incorporar na máquina. Foram também expostas muitas das ideias e conceitos desenvolvidos na fase 1, finalizando com um princípio de solução para o funcionamento da máquina.

Nos subcapítulos 3.3 e 3.4 foi desenvolvido o princípio de solução escolhido, terminando com a descrição e caracterização da solução conceptual. Esta descrição envolveu a identificação dos conjuntos funcionais da máquina, os seus componentes e movimentos. Estes foram tabelados, codificados e descritos, com suficiente detalhe, para plena compreensão de toda a solução proposta.

Concluindo, este Capítulo termina com a apresentação de uma solução conceptual sólida, que permite avaliar a viabilidade do desenvolvimento da máquina. Esta solução foi apresentada à *WEG S.A.*, como estudo prévio, confirmando o cumprimento dos requisitos impostos e a continuidade do projecto. Assim, esta solução é utilizada como solução base para o desenvolvimento da solução construtiva da máquina, como descrito no Capítulo 4.

Capítulo 4

Solução construtiva

4.1 Introdução

Neste Capítulo é apresentada a fase 3 do projeto desenvolvido, como referido no subcapítulo 3.1, e são abordadas as soluções construtivas seleccionadas para cada um dos componentes previamente mencionados. O Capítulo está dividido em vários subcapítulos, sendo aqui brevemente resumidos.

O subcapítulo 4.2 apresenta, de uma forma global, a solução construtiva desenvolvida. Esta, baseada na solução conceptual, é modelada tridimensionalmente em formato *CAD* com recurso ao *software Solidworks*. Analogamente ao executado no Capítulo 3, os componentes da máquina são codificados e tabelados.

Os subcapítulos 4.3, 4.4 e 4.5 descrevem as soluções adotadas para cada conjunto funcional, bem como o seu processo de desenvolvimento. São também apresentadas imagens 3D dos componentes e justificada a sua seleção.

O subcapítulo 4.6 resume todo o Capítulo, terminando com algumas conclusões e apreciações sobre o trabalho realizado.

4.2 Solução global

A solução construtiva desenvolvida é apresentada nas Figura 4.1. As suas dimensões limite são 5990 mm de comprimento, 2930 mm de altura e 2060 mm de largura, como ilustrado na Figura 4.2.



Figura 4.1 - Solução construtiva - Modelo global

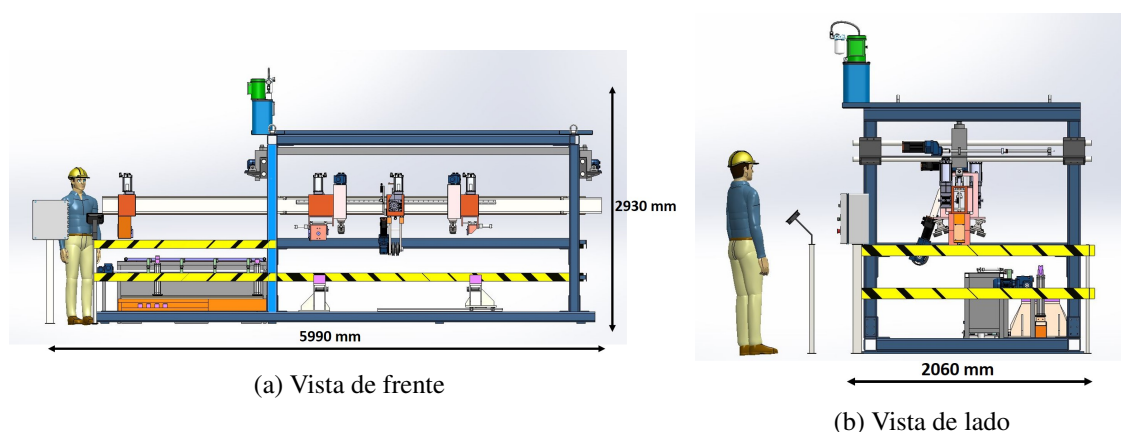


Figura 4.2 - Dimensões gerais da máquina

Com o desenvolver do projeto foram necessárias alterações à solução conceptual, devido a novas especificações impostas e a pormenores funcionais anteriormente não identificados. Assim, embora semelhante, a solução construtiva apresenta algumas diferenças relevantes relativamente à solução previamente descrita.

Conforme realizado no Capítulo 3, os componentes dos 3 conjuntos funcionais da máquina são então codificados e tabelados. Apesar de alguns desses componentes já terem sido previamente descritos, não foram codificados, e durante o desenvolvimento da solução verificou-se que estes constituíam componentes independentes, cada um representando uma função específica da máquina, com necessidade de movimentos e funções adicionais às previstas. Consequentemente, esta codificação sofreu alterações correspondentes às diferenças entre as duas soluções, sendo reestruturada e organizada, com o intuito de adequar à nova solução.

Na Tabela 4.1 pode observar-se a antiga e a nova codificação, estando destacados os novos componentes.

Tabela 4.1 - Componentes principais - solução construtiva

Componentes principais		
Código	Nome do componente (solução construtiva)	Nome e código do componente (solução conceptual)
Conjunto A	Estrutura de suporte	Estrutura de suporte
A1	Base	Base
A2	Estrutura porticada	Estrutura porticada
A3	Viga de interligação	Viga de interligação
A4	Apoio fixo do rotor	Apoio fixo do rotor
A5	Apoio móvel do rotor	Apoio móvel do rotor
Conjunto B	Ferramenta de manipulação	Ferramenta de manipulação
B1	Viga da ferramenta de manipulação	Não existente
B2	Grampo da direita	B1 - Grampo móvel
B3	Grampo da esquerda	B2 - Grampo fixo
B4	Sistema de cravação	B3 - Carruagem de cravação
B5	Sistema de rotação	B4 - Roda de fricção
B6	Sistema de posicionamento	Não existente
B7	Batentes do rotor	Não existente
B8	Esbarro móvel	B5 - Esbarro móvel
Conjunto C	Módulo de alimentação das barras	Módulo de alimentação das barras
C1	Depósito de barras	C1 - Depósito de barras
C2	Mesa de elevação das barras	C2 - Mesa de elevação das barras

Ao analisar a tabela constata-se que o número de componentes funcionais não aumentou consideravelmente, mantendo-se a solução bastante semelhante ao princípio base.

4.3 Conjunto funcional A

Na Figura 4.3 está representado o conjunto funcional A. Na Tabela 4.2 estão identificados os respetivos movimentos, assim como a solução construtiva escolhida.

4.3.1 Componente A1- Base

A máquina não necessita de uma elevada área de contacto com o chão, só sendo fundamental o apoio da estrutura porticada, dos componentes A4 e A5 e do conjunto funcional C. Assim, a base

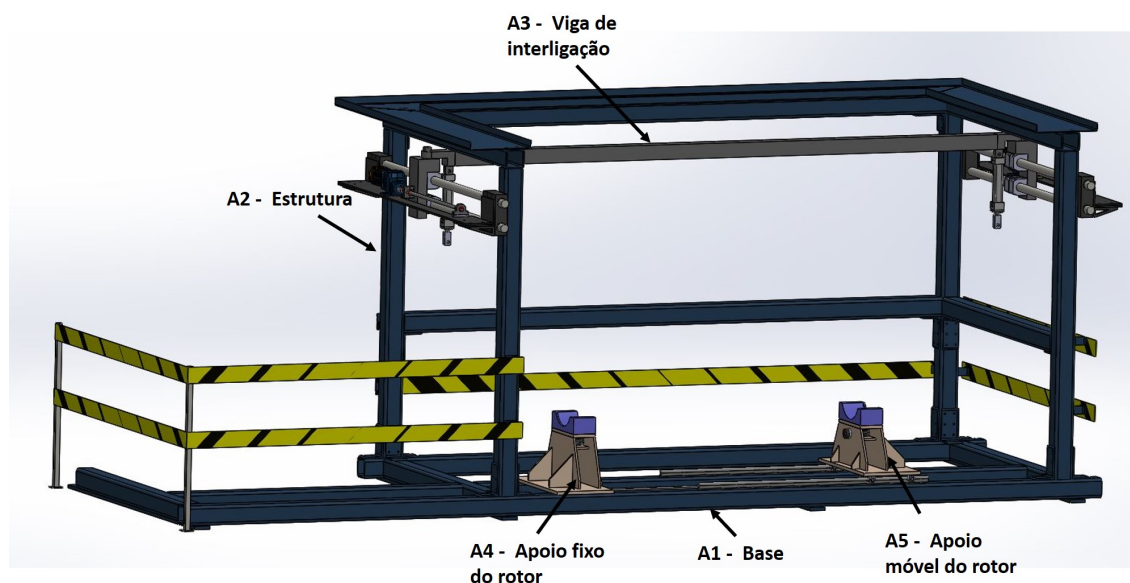


Figura 4.3 - Conjunto funcional A - solução construtiva

Tabela 4.2 - Movimentos do conjunto A - solução construtiva

Conjunto A			
Componente	Movimento	Descrição	Solução construtiva
A3	A30	Mov. de translação da viga de interligação	Servomotor, redutor e fuso de esferas
A3	A31	Mov. de elevação da ferramenta de manipulação	Cilindro hidráulico
A4	A40	Mov. de bloqueio do rotor - apoio fixo	Cilindro pneumático
A5	A50	Mov. do apoio móvel do rotor	Cilindro hidráulico
A5	A51	Mov. de bloqueio do rotor - apoio móvel	Cilindro pneumático

apresenta uma geometria como representado na Figura 4.4. Esta é composta por perfis tubulares de secção quadrada de 120 mm de lado.

Pode ser dividida em duas secções, A e B, unidas por uma viga tubular, perpendicular ao seu comprimento. A secção mais à direita, secção B, é a zona principal de trabalho da máquina e nela existe um tubo longitudinal adicional, criando uma subsecção, onde estão os apoios do rotor (componentes A4 e A5). A secção A contém o conjunto funcional C. É aberta no lado oposto ao local de trabalho do rotor, permitindo, assim, o carregamento de barras no depósito do conjunto C, pela parte posterior da máquina.

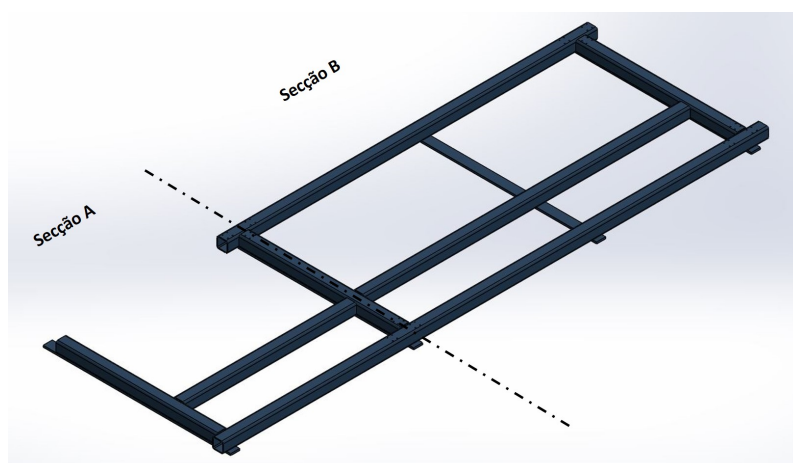


Figura 4.4 - Componente A1 - Base

4.3.2 Componente A2- Estrutura porticada

O componente A2 é apresentado na Figura 4.5. Este componente é também constituído por perfis tubulares de secção quadrada, com as mesmas dimensões dos perfis da base.

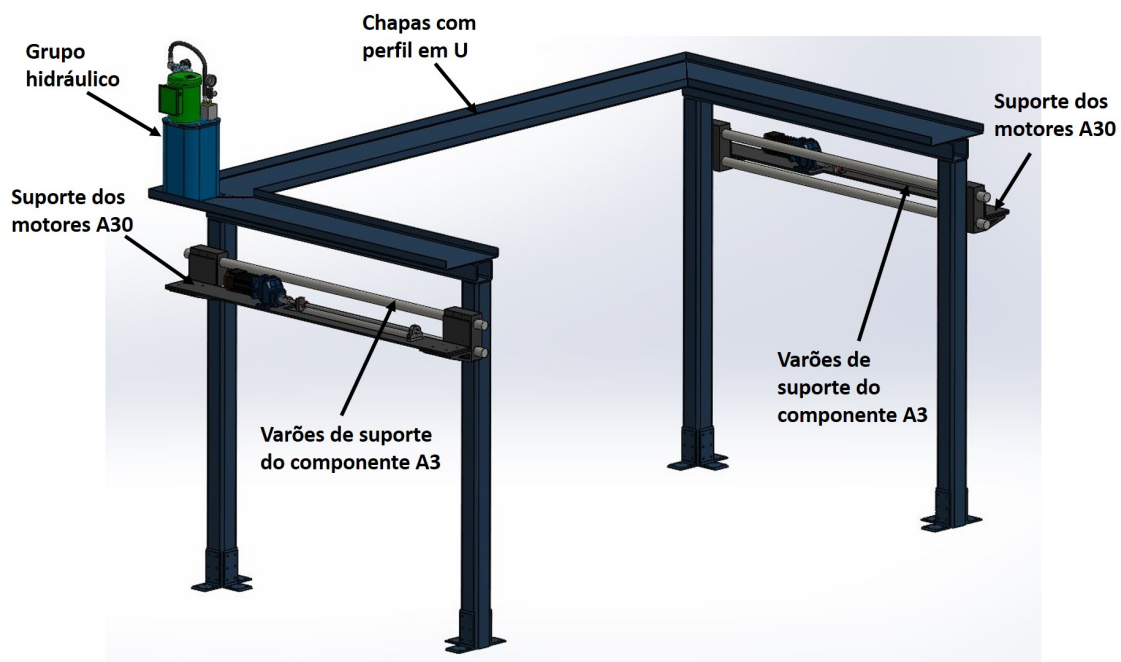


Figura 4.5 - Componente A2 - Estrutura porticada

Devido à sua função de suporte estrutural da ferramenta de manipulação, estas 4 colunas são interligadas por outros perfis tubulares, colocados transversalmente à altura máxima e a meia altura da estrutura, garantindo assim uma estrutura robusta e capaz de ser movimentada por intermédio de olhais no seu topo. Contudo, em virtude da alimentação do rotor ser realizada por um movimento

vertical, esta estrutura tem de ser aberta num dos seus lados, para permitir a introdução do rotor através de uma ponte rolante.

Instalados entre colunas ao longo da largura da estrutura, estão os atuadores do movimento A30, suportados por uma chapa robusta fixa aos perfis tubulares. Entre essas mesmas colunas existem dois varões de cada lado, com 50 *mm* de diâmetro, que sustentam e guiam o componente A3, que é a viga de interligação.

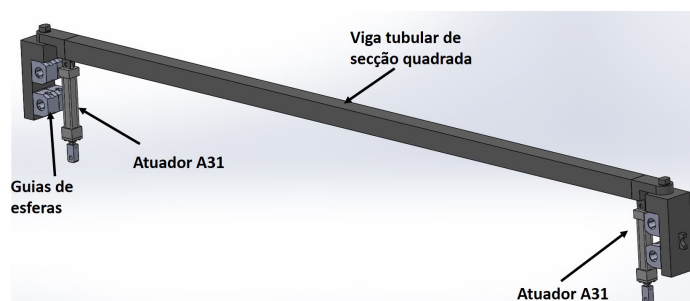
No topo da estrutura, fixas às vigas superiores, estão chapas quinadas em U, de elevada largura, que completam a ligação superior da estrutura. Estas são utilizadas para a organização e acomodação de todo o equipamento hidráulico, pneumático e elétrico adicional requerido pela ferramenta manipulação, possuindo a vantagem de proximidade comparativamente a equipamento colocado no solo, que se encontra a mais de 2 *m* de distância.

4.3.3 Componente A3 - Viga de interligação

Na Figura 4.6 está representada a viga de interligação. Como anteriormente referido, esta viga é responsável pelos movimentos A30 e A31.



(a) Viga de interligação inserida no conjunto A



(b) Viga de interligação e atuadores A31

Figura 4.6 - Componente A3 - Viga de interligação

Movimento A30

Este movimento, apesar de elevada importância, só é realizado duas vezes por ciclo de produção, no início, depois do rotor ter sido apoiado, e no final, para se poder retirar o rotor. É portanto, um movimento de pouco significado na avaliação temporal da máquina.

Como é esta viga que suporta a ferramenta de manipulação, optou-se por impor uma velocidade não muito elevada, entre 50 e 100 mm/s, e uma aceleração de reduzida ordem de grandeza.

Este movimento necessita ser rigorosamente controlado, de forma a garantir a posição da viga no mesmo plano do eixo do rotor. Assim, é adoptada uma solução com um servomotor, um redutor e um fuso de esferas, como se pode observar na Figura 4.7.

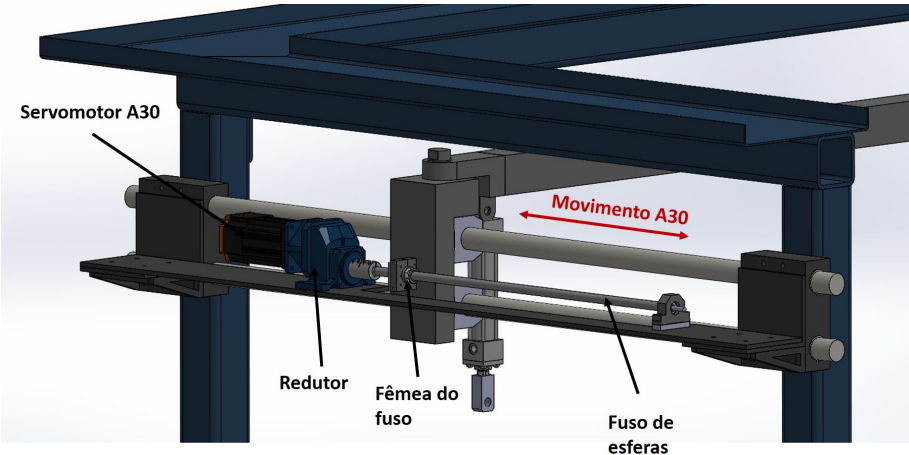


Figura 4.7 - Movimento A30 - Servomotor A30 e fuso de esferas

São então colocados 2 servomotores, um em cada ponta da viga, permitindo assim um controlo simultâneo dos dois eixos. Ao mesmo tempo, esta solução também diminui o esforço requerido aos servomotores, podendo então ser seleccionados servomotores compactos, de baixa potência e pequena dimensão, o que facilita a sua acomodação na estrutura. As características deste accionamento estão apresentadas na Tabela 4.3.

O redutor utilizado é um redutor de engrenagens helicoidais, com a saída do veio no mesmo eixo da sua entrada. O fuso utilizado é um fuso de esferas convencional, não requerendo elevadas características dinâmicas. Contudo, nesta aplicação, é necessário considerar as folgas dos fusos a utilizar, para conseguir controlar corretamente os dois servomotores.

Tabela 4.3 - Características do accionamento A30

A30	
Características	
Tipo construtivo	Servomotor tamanho 40 e redutor rodas helicoidais
Energia	Elétrica
Potência nominal [kW]	0.7
Velocidade nominal [rpm]	3000
Binário nominal [Nm]	2,6
Razão de redução	4,58
Velocidade de saída do redutor [rpm]	305
Velocidade linear [mm/s]	100

Movimento A31

O movimento A31 é realizado por dois cilindros hidráulicos suspensos como observado na Figura 4.6.

Estes cilindros estão fixos à viga de interligação e à ferramenta de manipulação através de olhais conforme mostrado na Figura 4.8, garantindo assim uma flexibilidade a esforços transversais, permitindo algum ajuste da ferramenta de manipulação quando está apoiada no rotor.

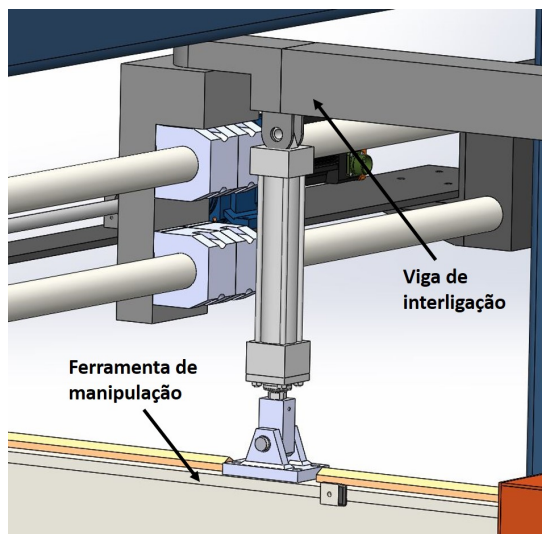


Figura 4.8 - Ligações dos cilindros A31

As características dos cilindros escolhidos estão representadas na Tabela 4.4. Estes apresentam um curso reduzido, só o necessário para a elevação da ferramenta de manipulação. O esforço exigido é também modesto, só o necessário para elevar a ferramenta de manipulação, fazendo com que os cilindros possam operar a baixas pressões.

Tabela 4.4 - Característica do acionamento A31

A31	
Características	
Tipo construtivo	De duplo efeito assimétrico
Energia	Hidráulica
Diâmetro do êmbolo [mm]	40
Diâmetro da haste [mm]	28
Curso [mm]	200
Velocidade [mm/s]	50
Tempo [s]	4

4.3.4 Componente A4 - Apoio fixo do rotor

Os apoios do rotor são componentes constituídos por uma parte estrutural, composta por chapas de aço soldadas, e uma parte substituível, onde é apoiado o veio do rotor.

O apoio fixo do rotor está apresentado na Figura 4.9.

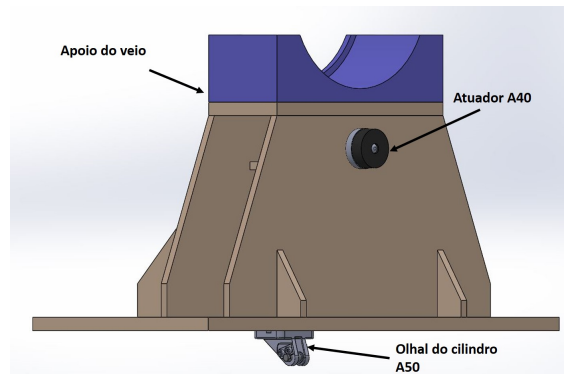


Figura 4.9 - Componente A4 - Apoio fixo do rotor

Movimento A40

O movimento A40 é realizado por intermédio de um cilindro pneumático de pequena dimensão com um elemento travão acoplado na ponta da haste, representado na Figura 4.10.

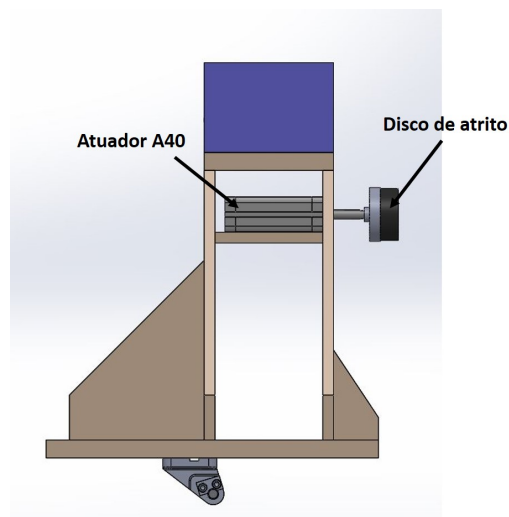


Figura 4.10 - Atuador A40

Este cilindro está inserido entre as chapas do apoio do rotor. Quando atuado, ataca a face lateral do rotor com o elemento travão, assegurando assim o seu bloqueio.

O elemento travão é constituído por um disco de atrito, formado por um material polímero.

As características do acionamento A40 estão representadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Características do acionamento A40

A40	
Características	
Tipo construtivo	Cil. Compacto, assimétrico de haste simples e duplo efeito
Energia	Pneumática
Diâmetro do êmbolo [mm]	25
Curso [mm]	70
Velocidade [mm/s]	50
Tempo [s]	1,4
Força de avanço [kN]	0,295
Força de recuo [kN]	0,247

4.3.5 Componente A5 - Apoio móvel do rotor

O apoio móvel do rotor é estruturalmente idêntico ao apoio fixo, como observado na Figura 4.11, diferenciando-se na sua altura. Esta é menor do que a no apoio fixo, de modo a compensar a altura das guias nos quais é suportado.

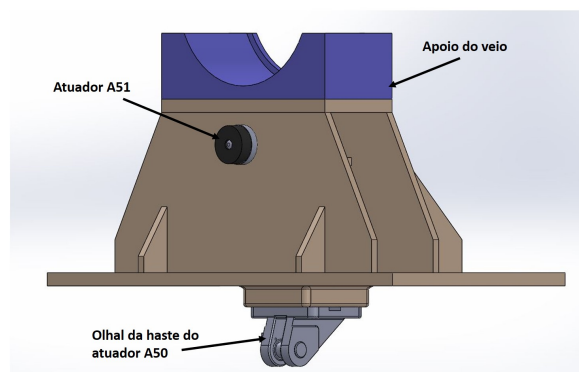


Figura 4.11 - Componente A5 - Apoio móvel do rotor

Movimento A50

O movimento horizontal do apoio móvel do rotor é realizado através de um cilindro hidráulico de curso longo, que se encontra por baixo dos componentes A4 e A5, como esquematizado na Figuras 4.12 e 4.13 e caracterizado na Tabela 4.6. Este cilindro é acoplado às bases da estrutura dos apoios do rotor através de olhais.

O apoio móvel está suportado por guias lineares, garantindo assim o guiamento deste componente.

Tabela 4.6 - Características do acionamento A50

A50	
Características	
Tipo construtivo	Assimétrico de haste simples e duplo efeito
Energia	Hidráulica
Diâmetro do êmbolo [mm]	32
Diâmetro da haste [mm]	22
Curso [mm]	1000
Velocidade [mm/s]	100
Tempo [s]	10
Força de avanço [kN]	3,2
Força de recuo [kN]	1,7

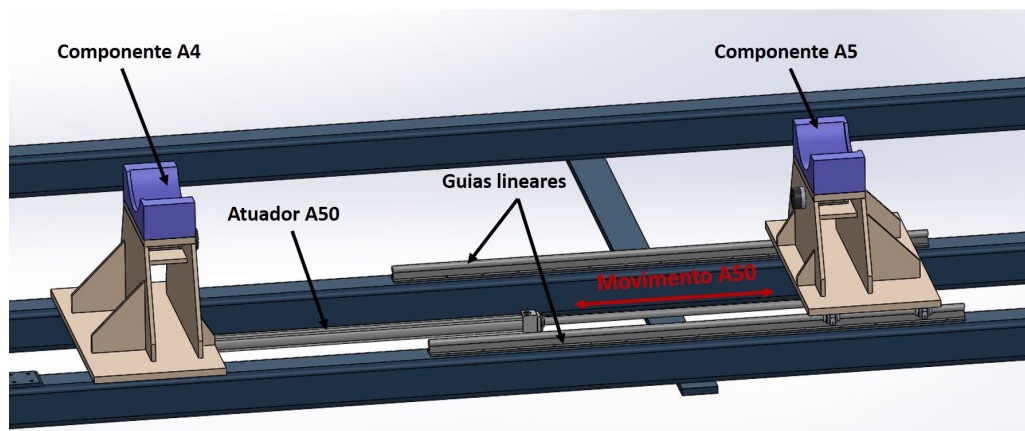


Figura 4.12 - Movimento A50

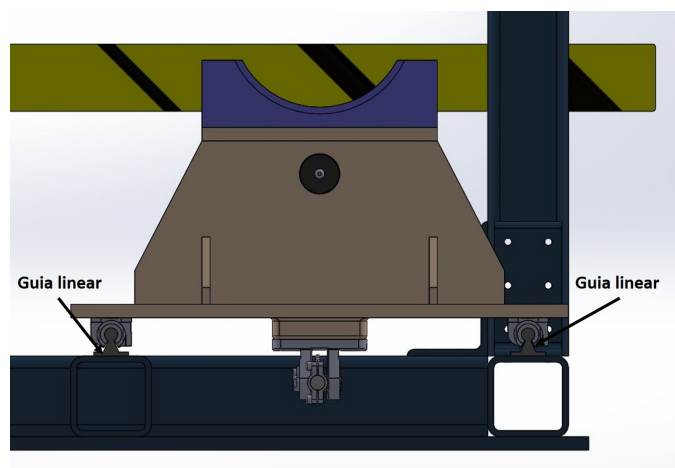
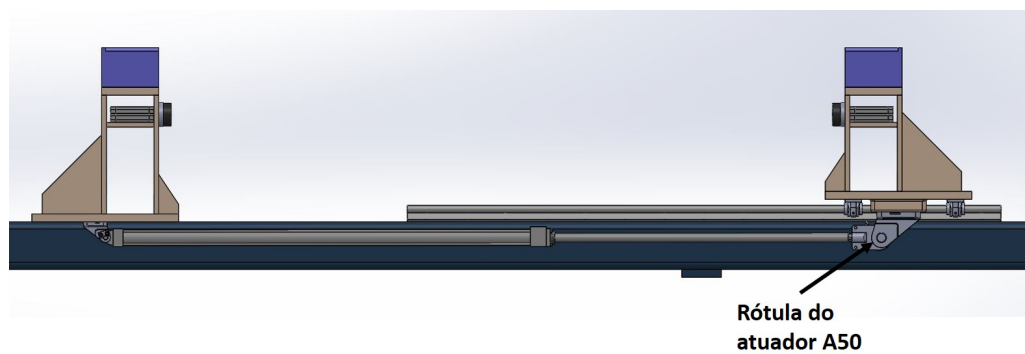


Figura 4.13 - Movimento A50 - vistas adicionais em corte

Movimento A51

Este movimento é idêntico, mas simétrico ao movimento A40. Assim sendo, a sua descrição e caracterização não é necessária.

4.4 Conjunto funcional B

O conjunto funcional B é aquele que sofreu mais alterações relativamente ao apresentado na solução conceptual, principalmente devido a problemas de compatibilização dos mecanismos com a elevada gama de rotores e de barras. O modelo deste conjunto é mostrado na Figura 4.14

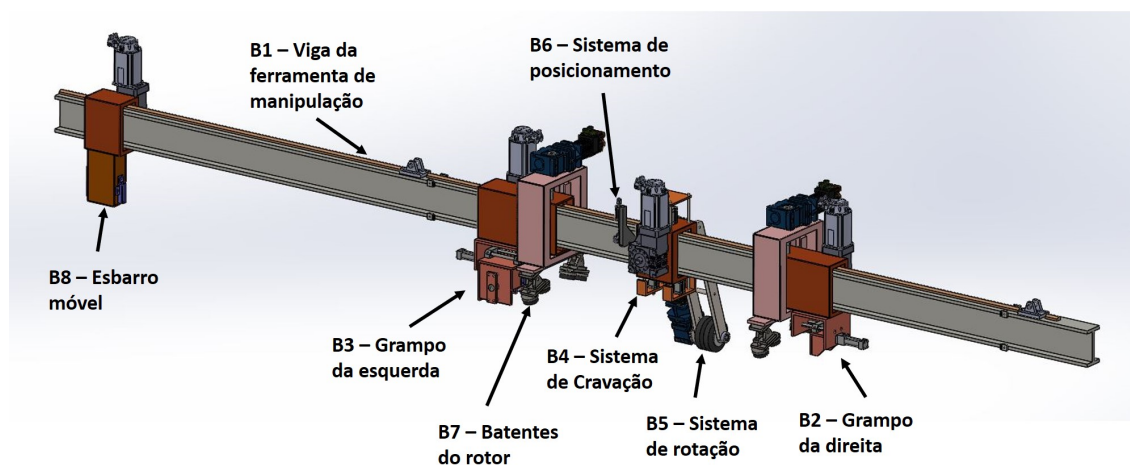


Figura 4.14 - Conjunto funcional B - solução construtiva

Na Tabela 4.7 estão apresentados os novos componentes e movimentos associados a este conjunto.

4.4.1 Componente B1 - Viga da ferramenta de manipulação

Na ferramenta de manipulação deslocam-se as carruagens que contêm as ferramentas necessárias às diferentes operações da máquina, correspondendo aos movimentos B10, B11, B12 e B13. Assim, a ferramenta de manipulação é um conjunto bastante solicitado, contendo a maioria dos equipamentos da máquina, exigindo, por isso, um corpo rígido e resistente à flexão.

Deste modo, o conjunto B, é constituído por uma viga de secção transversal I, representada na Figura 4.15, com as seguintes dimensões:

- Comprimento: 5800 mm;
- Altura da viga : 182 mm;

- Largura do banzo da secção I: 100 mm;
- Espessura do banzo da secção I: 16 mm;
- Espessura da alma da secção I: 16 mm.

Tabela 4.7 - Movimentos do conjunto B - solução construtiva

Conjunto B			
Componente	Movimento	Descrição	Solução construtiva
B1	B10	Mov. horizontal da car- ruagem do grampo da di- reita	Servomotor, redutor, pi- nhão e cremalheira
B1	B11	Mov. horizontal da car- ruagem do grampo da es- querda	Servomotor, redutor, pi- nhão e cremalheira
B1	B12	Mov. horizontal da carru- agem do sistema de crava- ção	Servomotor, redutor, pi- nhão e cremalheira
B1	B13	Mov. horizontal da carru- agem do esbarro móvel	Servomotor, redutor, pi- nhão e cremalheira
B2	B20	Mov. de aperto do grampo da direita	Cilindro hidráulico
B3	B30	Mov. de aperto do grampo da esquerda	Cilindro hidráulico
B3	B31	Mov. de avanço incre- mental da barra	Cilindro hidráulico
B3	B32	Mov. de aperto lateral da barra	Cilindro hidráulico
B4	B40	Mov. vertical do sistema de cravação	Cilindro pneumático
B4	B41	Mov. de cravação do pun- ção de cravação	Cilindro pneumático
B5	B50	Mov. de aproximação do sistema de rotação	Cilindro pneumático
B5	B51	Rotação da roda de fric- ção	Servomotor e redutor
B6	B60	Mov. de aproximação do sistema de posiciona- mento	Atuador angular pneumá- tico
B6	B61	Mov. vertical do rolete de posicionamento	Cilindro pneumático
B7	B70	Mov. vertical do batente do rotor	Servomotor e redutor
B8	B80	Mov. de inserção rápida da barra	Servomotor, redutor, pi- nhão e cremalheira

Uma viga com secção transversal I apresenta um adequado momento de inércia e resistência à flexão, permitindo que a viga não atinja dimensões excessivas, mas mantendo as capacidades estruturais necessárias.

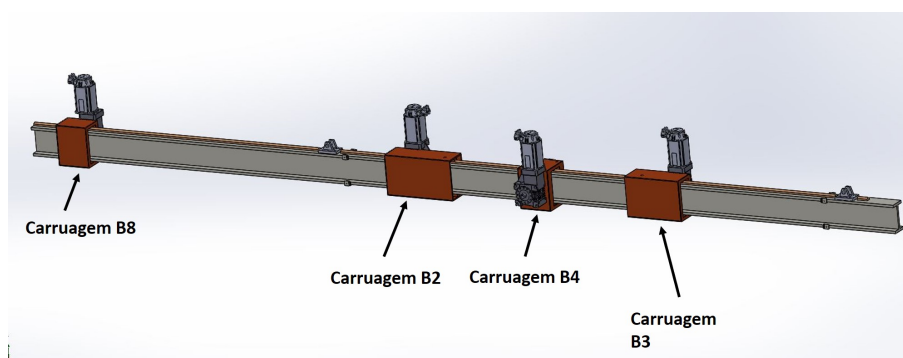


Figura 4.15 - Componente B1 - Viga da ferramenta de manipulação

Movimentos B10, B11, B12 e B13

Os movimentos B10, B11, B12 e B13 representam as deslocações ao longo da viga das carruagens:

- do grampo da direita;
- do grampo da esquerda;
- do sistema de cravação;
- do esbarro móvel.

As carruagens são todas idênticas, podendo só variar na sua dimensão, conforme os requisitos da função que realizam. Na Figura 4.16 é apresentado o modelo de uma carruagem utilizada.

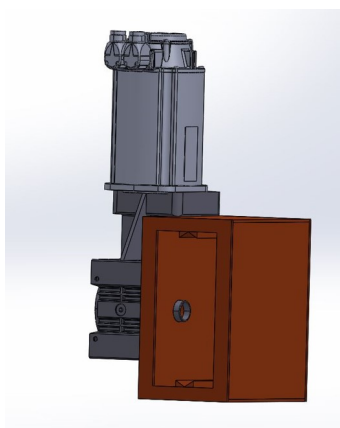


Figura 4.16 - Modelo de uma carruagem (B10 a B13)

Todos estes movimentos necessitam de realizar um deslocamento de translação ao longo da ferramenta de manipulação rigorosamente controlado. Tendo em conta o elevado comprimento da viga, uma solução comum para todas as carruagens torna-se demasiado interessante para não ser considerada. Um fuso, ao longo do comprimento da viga, ou um sistema pinhão-cremalheira foram as soluções abordadas.

Os fusos, apesar de serem altamente eficientes e apresentarem folgas pequenas, não são interessantes em aplicações de deslocamentos demasiado longos. Comparativamente ao sistema pinhão-cremalheira, apresentam também menor capacidade de força, requisito necessário nas carruagens dos grampos para suportar a força de compressão por eles exercida no rotor.

Uma das desvantagens da transmissão por pinhão-cremalheira é a necessidade de os motores elétricos de accionamento serem móveis, incluindo toda a sua cablagem. No entanto, neste caso, esse problema é ultrapassado colocando os motores elétricos nas próprias carruagens, tornando assim a solução muito mais compacta do que seria possível com a aplicação de um fuso. A cremalheira pode ser colocada na alma da viga, imediatamente debaixo do banzo superior, com os dentes orientados para baixo, como exemplificado na Figura 4.17, ficando assim protegida de poeiras e outros resíduos.

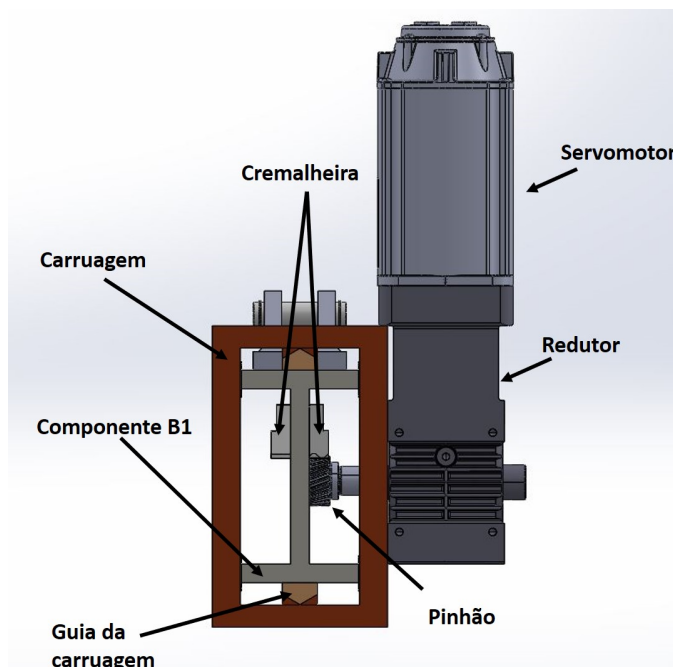


Figura 4.17 - Secção do componente B1 - Detalhe dos movimentos B10 a B13

Assim, foi adotado o sistema de transmissão pinhão-cremalheira para os movimentos B10, B11, B12 e B13. Na Figura 4.18 estão representados diversos componentes e pormenores do sistema, sendo posteriormente descritos.

Para permitir que todas as carruagens se desloquem ao longo da ferramenta de manipulação, a cremalheira tem de ter aproximadamente da dimensão da viga. De forma a limitar o curso de cada carruagem, são colocados uns batentes nos banzos da viga, que podem ser observados na Figura 4.18.

O suporte e guiamento das carruagens é assegurado por umas guias incorporadas nas superfícies superior e inferior da viga.

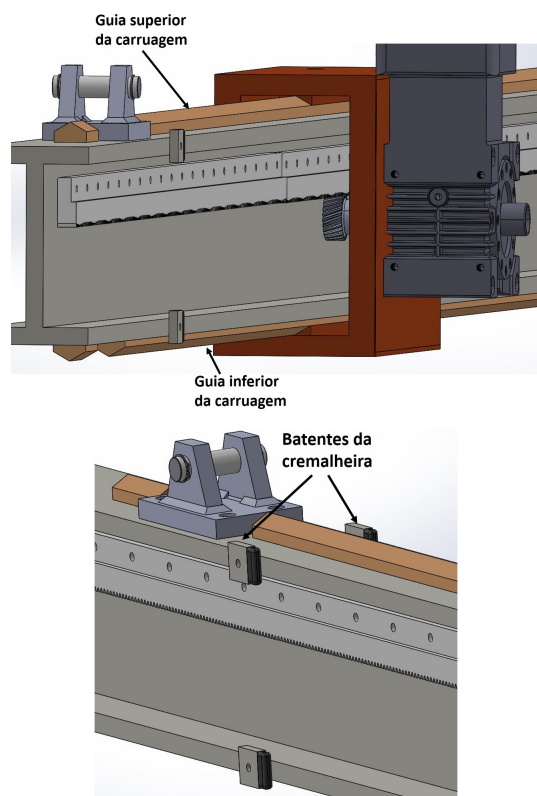


Figura 4.18 - Detalhes construtivos associados aos movimentos B10 a B13

É utilizado um servomotor para cada carruagem, ficando assim possível o controlo independente de cada movimento. As características deste acionamento são apresentadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Características dos acionamentos B10, B11, B12 e B13

B10, B11, B12, B13	
Características	
Tipo construtivo	Servomotor tamanho 60 e redutor de roda de coroa e parafuso sem fim
Energia	Elétrica
Velocidade nominal $[rpm]$	4200
Binário nominal $[Nm]$	3,5
Razão de redução	6,75
Velocidade linear $[mm/s]$	150

O redutor acoplado a este servomotor é um redutor de roda de coroa e parafuso sem fim. Este apresenta a sua saída a 90 °relativamente ao veio do servomotor, o que se demonstra benéfico para o seu acoplamento à carruagem, permitindo que este sistema seja fixo numa das chapas laterais da carruagem, conforme demonstrado na Figura 4.17. Adicionalmente, a capacidade de autofrenagem deste tipo de redutor é fundamental para garantir o bloqueio das carruagens.

O componente B3, denominado grampo fixo no Capítulo 3, sofreu alterações no decorrer do desenvolvimento da solução construtiva, nomeadamente a adição do movimento horizontal da sua carruagem, movimento B11. Este mostrou-se necessário para acomodar as diferenças de

comprimento das secções do veio entre a zona de apoio e a face do rotor que, apesar de não mencionado no Capítulo 2, podem variar consideravelmente. Contudo, apesar deste movimento apresentar um curso potencial semelhante aos movimentos B10, B12 e B13, a sua utilização será significativamente mais reduzida.

Por consequência, o designado “grampo fixo” passa a ser designado por “grampo da esquerda”. Do mesmo modo, o designado “grampo móvel” correspondente ao componente B2 passa doravante a ser designado por “grampo da direita”.

4.4.2 Componente B2 - Grampo da direita

O grampo da direita, anteriormente designado grampo móvel, está representado na Figura 4.19.

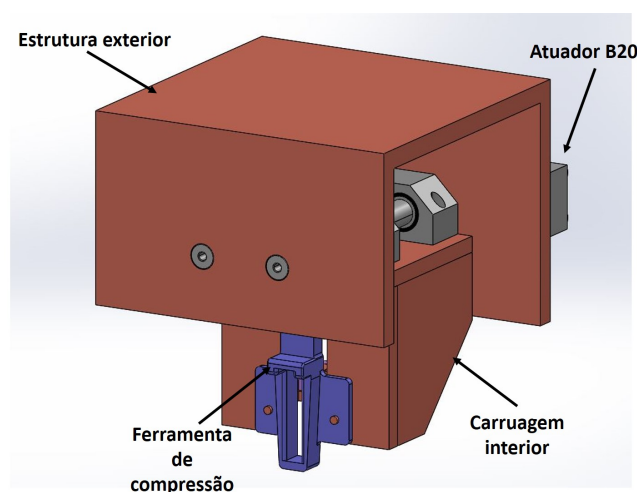


Figura 4.19 - Componente B2 - grampo da direita

É composto por uma estrutura exterior e uma carruagem interior, ambas produzidas a partir de chapas metálicas maquinadas e aparafusadas.

Movimento B20

O movimento de aperto do grampo da direita é realizado através de um cilindro hidráulico, estando encarregue da compressão das chapas de aperto do rotor na face direita. Este atuador está caracterizado na Tabela 4.9. A carruagem interior deste componente está suportada por dois veios, que unem as duas chapas opostas da estrutura do grampo, e desloca-se por toda a extensão dos mesmos, atuada pelo cilindro hidráulico, como demonstrado na Figura 4.20. Este cilindro é fixo na estrutura exterior do grampo por flange.

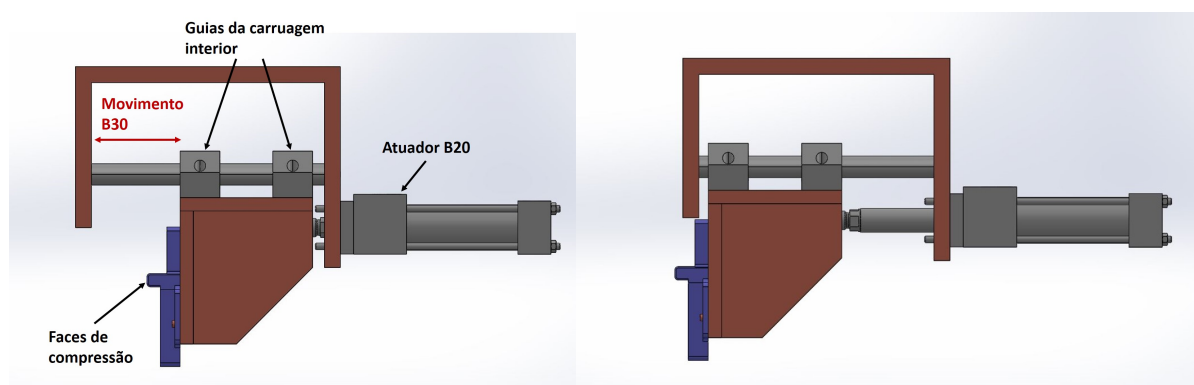


Figura 4.20 - Movimento B20

A ferramenta de compressão frontal desta carruagem contém um rasgo suficientemente grande para acomodar uma barra de secção máxima, permitindo que o grampo se aproxime da chapa de aperto do rotor para realizar a sua compressão. Esta ferramenta é uma peça substituível e adaptada a cada barra. Na Figura 4.21, são apresentados detalhes das ferramentas, para os casos de uma barra de secção máxima e de uma barra de secção mínima. A ferramenta apresenta duas superfícies de encosto, capazes de comprimir a chapa de aperto do rotor. Simultaneamente, estas faces necessitam de ter uma dimensão reduzida para não interferirem com as ranhuras e barras adjacentes às que estão a comprimir.

Tabela 4.9 - Características do acionamento B20

B20	
Características	
Tipo construtivo	Assimétrico de haste simples e de duplo efeito
Energia	Hidráulica
Diâmetro do êmbolo [mm]	25
Diâmetro da haste [mm]	18
Curso [mm]	60
Velocidade [mm/s]	50
Tempo [s]	1,2

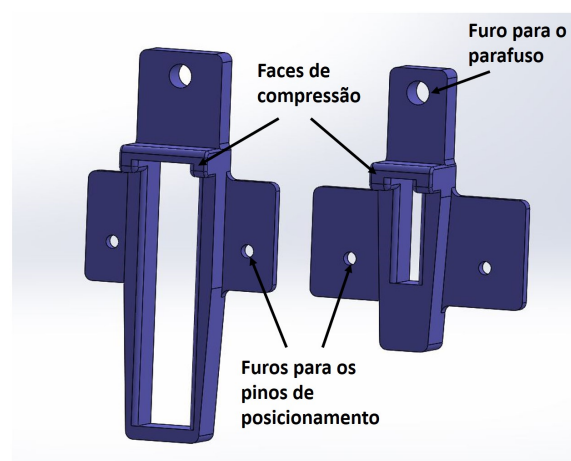


Figura 4.21 - Ferramenta do grampo para barra de dimensões $90 \times 20 \text{ mm}$ e uma de $30 \times 8 \text{ mm}$

As ferramentas de compressão são fixas à chapa frontal da carruagem através de um parafuso e o seu correto posicionamento é garantido através de 2 pinos. É de notar que as ferramentas para a secção máximas e mínimas possuem as mesmas dimensões extremas, só se distinguindo

na ranhura interna e no tamanho das faces de compressão. Assim, garante-se que o mesmo furo roscado e os pinos de posicionamento são compatíveis para todas as peças.

A carruagem integra igualmente o sistema de alinhamento de barras esquematizado na Figura 3.5 no subcapítulo 3.4. Está seguidamente (nas Figuras 4.22 e 4.23) representada mais em detalhe a sua solução construtiva, à excepção do sensor indutivo.

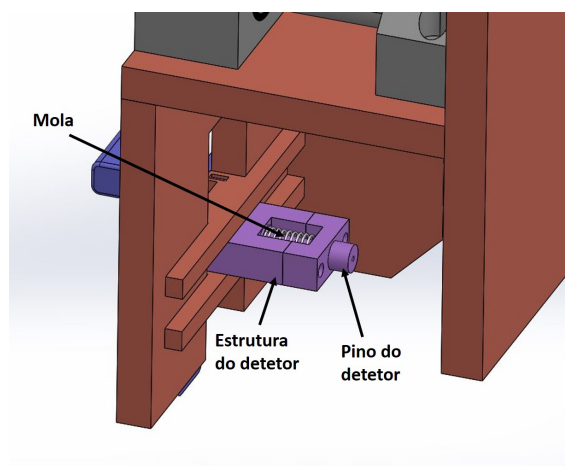


Figura 4.22 - Detetor de barras no componente B2

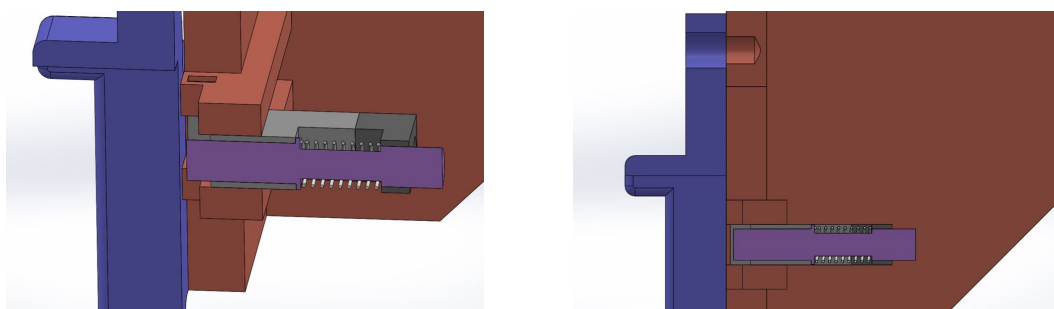


Figura 4.23 - Detetor de barras no componente B2 - Vistas em corte

Devido ao esforço exercido pelo cilindro hidráulico na compressão das chapas, é requerido que a estrutura exterior do componente B2 seja estruturalmente robusta. Assim, esta é composta por chapas, capazes de aguentar os devidos esforços.

4.4.3 Componente B3 - Grampo da esquerda

O grampo da esquerda, componente B3 anteriormente designado por grampo fixo, está representado na Figura 4.24

Este é idêntico ao componente B2, apenas diferindo na construção e na complexidade da sua carruagem interior, a qual cumpre diferentes funções.

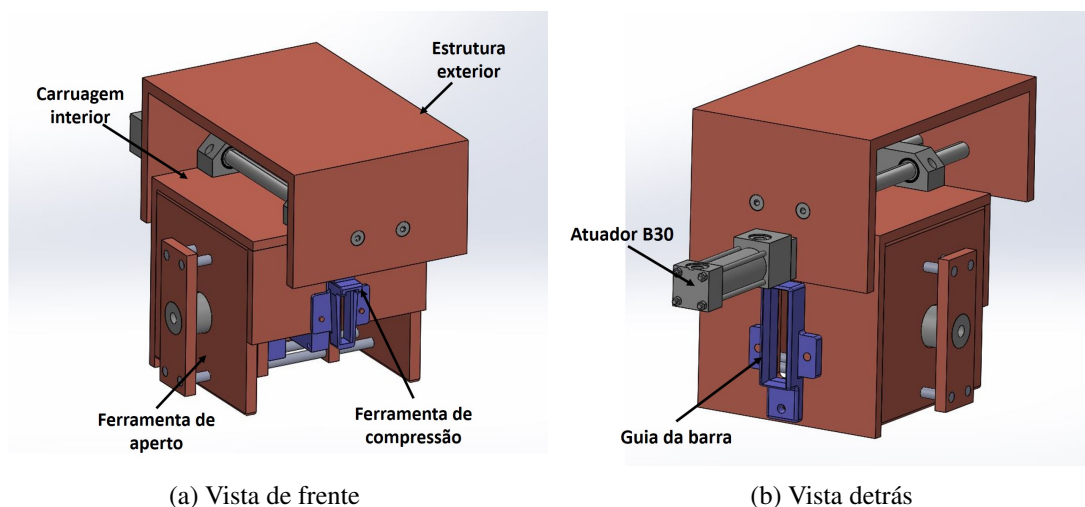


Figura 4.24 - Componente B3 - Grampo da esquerda

Esta carruagem, além de assegurar a compressão das chapas do rotor, é responsável pelo guiamento da barra durante a inserção e ainda pela sua inserção forçada.

O guiamento é garantido através de duas peças semelhantes à ferramenta frontal do grampo, mas geometricamente mais ajustadas à secção da barra, apresentando uma folga lateral relativa à barra de cerca de $0,5\text{ mm}$. Estas duas peças iguais, denominadas guias da barra, são acopladas ao componente B3 e ao esbarro móvel (B8) e estão representadas na Figura 4.25. Ao contrário da ferramenta frontal do grampo, estas não apresentam faces compressoras, sendo exclusivamente peças de guiamento.

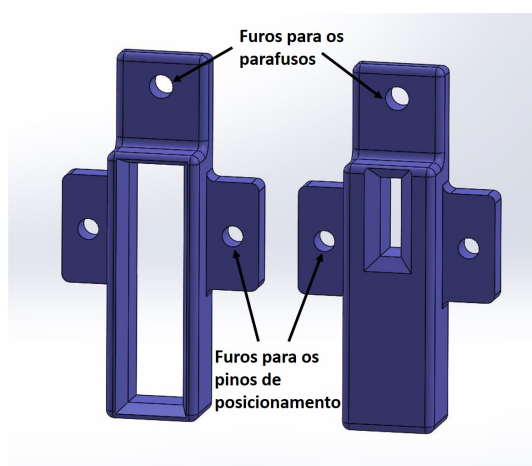


Figura 4.25 - Ferramenta de guiamento de barra de dimensões $90 \times 20\text{ mm}$ e de $30 \times 8\text{ mm}$

No caso do grampo da esquerda, esta guia encontra-se na face da carruagem oposta à ferramenta frontal do grampo, isto é, na face de trás, como ilustrado na 4.24b. A peça apresenta o mesmo sistema de fixação que a ferramenta do grampo, só invertendo a posição do furo roscado, passando-o de cima da peça para baixo, de forma a ser compatível com a estrutura da carruagem.

Devido ao movimento B12, o componente B3 pode recuar, aproximando-se da face fixa da barra quando esta se encontra na mesa de elevação, auxiliando assim o seu guiamento inicial. Esta etapa da sequência de trabalho será melhor detalhada no Capítulo 5.

Movimento B30

O movimento B30 é semelhante e simultâneo ao movimento B20. A chapa frontal da carruagem e a ferramenta de compressão deste componente são idênticas às correspondentes no componente B2.

Movimento B31

Este movimento, apesar de ser accionado pelo mesmo atuador que o B30, apresenta características dinâmicas diferentes. É responsável pela inserção quando esta se demonstra exigente dinamicamente, realizando avanços incrementais forçados, ou quando o movimento de inserção rápida atingiu o seu limite máximo. No caso da inserção forçada, a pressão disponível no atuador é significativamente maior do que a utilizada no B30. Para simular o impulso do martelo pneumático aplicado no processo atual quando uma barra encrava, este cilindro vai ser controlado temporalmente, isto é, a sua atuação vai ser cíclica, com tempos de ciclo curtos, criando assim atuações incrementais na barra, que facilitam a sua inserção.

Se a barra não ficar encravada, então o movimento de inserção rápida é executado até ao final do seu curso. Assim, o restante comprimento da barra é também inserido através de avanços incrementais do movimento B31, mas sem necessitar de elevada força, podendo ser realizado com o atuador B31 a menor pressão.

Movimento B32

O aperto lateral da barra (movimento B32), durante a atuação do movimento B31, é conseguido através de uma ferramenta específica, denominada ferramenta de aperto, e representada na Figura 4.26.

Esta é composta por uma estrutura em U, um cilindro hidráulico de haste mergulhante, 4 tirantes, 3 chapas solidárias com os tirantes, uma chapa móvel e uma ferramenta de aperto adaptada à barra a inserir.

Pelas abas da estrutura em U passam os 4 tirantes, relativamente à qual podem deslizar. Esses estão solidários com 2 chapas, externas à estrutura exterior, mantendo assim o deslocamento dos tirantes limitado. Dentro da estrutura em U existe mais uma flange solidária com os tirantes, que faz de encosto, e ainda outra que, sendo só guiada pelos tirantes, está livre para se movimentar e portanto realizar o aperto. A ferramenta é composta por duas metades, separadas por 4 molas, duas em cada extremo da ferramenta (inferior e superior), como esquematizado na Figura 4.27. Estas duas metades são cada uma fixa a uma das flanges, por parafuso, sendo o seu posicionamento

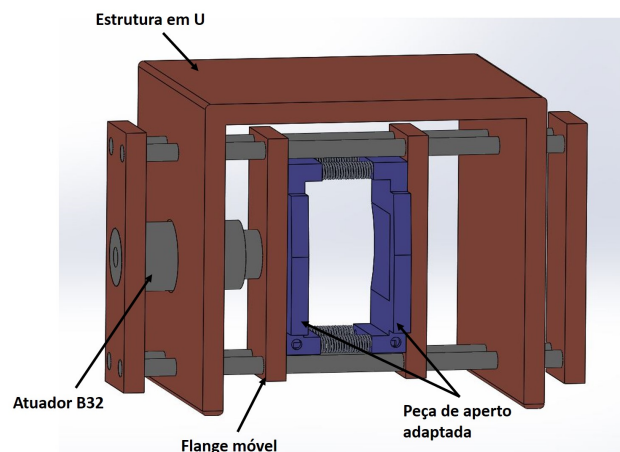


Figura 4.26 - Movimento B32 - Ferramenta de aperto

garantido por dois pinos. Finalmente, o cilindro hidráulico tem a haste roscada na flange móvel e o corpo na chapa da esquerda, exterior à estrutura em U.

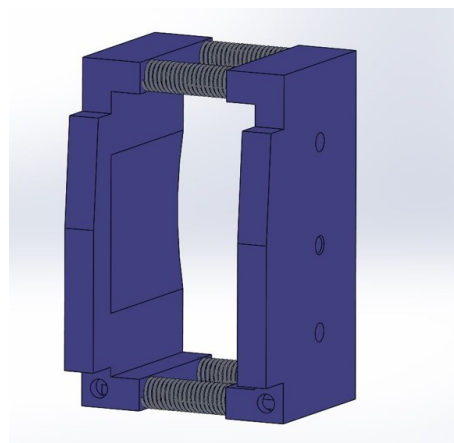


Figura 4.27 - Peça de aperto de barras para uma barra de dimensões $90 \times 20 \text{ mm}$

As características do cilindro hidráulico estão representadas na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Características do acionamento B32

B32	
Características	
Tipo construtivo	Assimétrico de haste simples e de simples efeito
Energia	Hidráulica
Diâmetro do êmbolo [mm]	28
Curso [mm]	20
Velocidade [mm/s]	50
Tempo [s]	0,4

O funcionamento deste mecanismo é descrito seguidamente:

- Em primeiro lugar, há que reconhecer que todos os elementos interligados pelos tirantes

estão livremente móveis de modo a que todo o conjunto se possa adaptar à barra quando esta se encontrar no seu interior;

- Quando o cilindro hidráulico avança, a sua chapa de suporte estrutural pode mover-se, mas o curso percorrido pelo atuador corresponde a um fecho efetivo da ferramenta, só contrariado pelas molas, numa primeira fase e pelo aperto da barra na segunda fase;
- Quando a pressão no atuador relaxar, este recua forçado pelas molas e assim deixa de apertar a barra.

Assim, este mecanismo permite o aperto lateral das barras evitando que este seja realizado rigidamente, isto é, permitindo que as peças se acomodem à posição onde se encontra a barra, cessando o risco de deformar a barra.

Os movimentos B31 e B32 são realizados de modo a que a barra seja inserida incrementalmente, estando a sua atuação descrita na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Sequência de movimentos da ferramenta de aperto

Etapa	Atuador B31	Atuador B32
Etapa inicial	Recuado	Recuado
Aperto da barra	Recuado	Avançado
Avanço da barra	Avançado	Avançado
Desaperto da barra	Avançado	Recuado
Recua para o estado inicial	Recuado	Recuado

4.4.4 Componente B4 - Sistema de cravação

Este sistema é montado na carruagem de cravação, como pode ser observado na Figura 4.28.

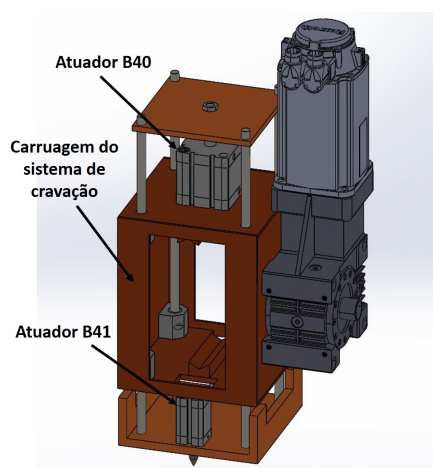


Figura 4.28 - Componente B4 - Sistema de cravação montado carruagem de cravação

Como previamente mencionado, este sistema é responsável pela cravação radial das barras e, para tal, apresenta dois movimentos independentes.

Movimento B40

Este movimento realiza a aproximação vertical do punção de cravação ao rasgo da ranhura do rotor. É realizado por um cilindro pneumático fixo pelo corpo à superfície superior da carruagem de cravação. A haste deste cilindro é roscada numa flange que move 4 tirantes, os quais atravessam a totalidade da carruagem e terminam igualmente roscados em outra flange, debaixo da carruagem, como pode ser visualizado na 4.29, com o cilindro atuado.

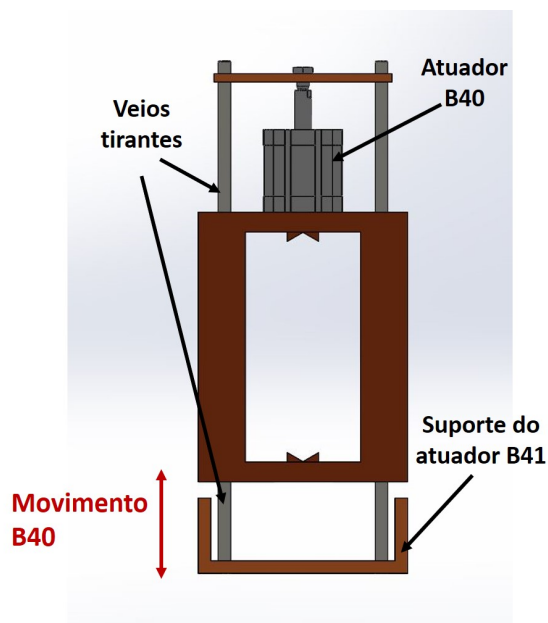


Figura 4.29 - Movimento B40

Na flange inferior são fixos os cilindros responsáveis pelo movimento de cravação. Assim, o movimento vertical de aproximação do punção é obtido através do cilindro pneumático que realiza o movimento B40.

O cilindro B40 está caracterizado na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Características do atuador B40

B40	
Características	
Tipo construtivo	Cil. Compacto, assimétrico de haste simples e duplo efeito
Energia	Pneumática
Diâmetro do êmbolo [mm]	63
Curso [mm]	30
Velocidade [mm/s]	50
Tempo [s]	0,6
Força de avanço [kN]	1,87
Força de recuo [kN]	1,75

Movimento B41

No Capítulo 3 foi apresentada a opção de cravação mediante uma cabeça de percussão com um excêntrico movido por um motor elétrico. Porém, depois de analisada, esta solução demonstrou-se dimensionalmente incompatível com o restante sistema de cravação. Adicionalmente, a hipótese de o sistema conter mais do que um punção, ao invés de só um, foi também um fator de relevância na modificação da solução face ao princípio avançado na solução conceptual.

Assim, é adotada uma solução baseada no movimento de vai e vem de dois cilindros pneumáticos de pequena dimensão, com um punção acoplado na ponta da haste, como ilustrado na Figura 4.30. Estes cilindros estão fixos na flange inferior descrita no movimento B40. Deste modo é possível ter 2 punções, obtendo assim um maior comprimento efetivamente cravado, apresentando mais pontos de cravação.

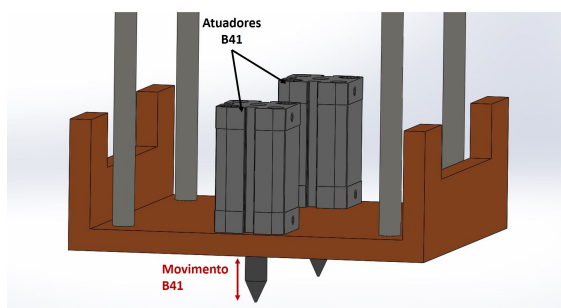


Figura 4.30 - Movimento B41

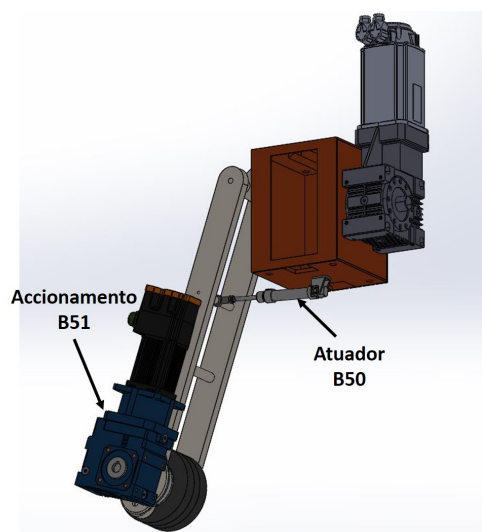
A cravação realizada no processo atual é manual, através da utilização de um escopro relativamente largo e um martelo, não requerendo um elevado esforço do operador, sendo mais repetitivo e exaustivo do que exigente fisicamente. Para a solução automática, o escopro é substituído por um punção de pequena dimensão que irá requerer muito menor força, mas um número muito maior de ações de cravação por unidade de comprimento. Consequentemente, o esforço estimado requerido aos cilindros B41 é pequeno, podendo estes ser de pequena dimensão, tornando a solução bastante compacta. Para absorver as vibrações dos movimentos cíclicos de cravação, a flange inferior apresenta uma secção transversal em U, com uma espessura de 12 mm. As características dos cilindros B41 estão apresentadas na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Características do atuador B41

B41	
Características	
Tipo construtivo	Cil. Compacto, assimétrico, de haste simples e duplo efeito
Energia	Pneumática
Diâmetro do êmbolo [mm]	25
Curso [mm]	30
Velocidade [mm/s]	100
Tempo [s]	0,2
Força de avanço [kN]	0,295
Força de recuo [kN]	0,247

4.4.5 Componente B5 - Sistema de rotação

A rotação do rotor é realizada mediante uma roda de fricção. A variação de diâmetros de rotor obriga a que a roda de fricção esteja fixa a um sistema de aproximação da superfície lateral do mesmo, como descrito na solução conceptual. O sistema desenvolvido para esta aplicação está apresentado na Figura 4.31.



(a) Sistema de rotação montado na carruagem de cravação



(b) Braço e roda de fricção do componente B5

Figura 4.31 - Componente B5 - Sistema de rotação

Este sistema é fixo lateralmente à carruagem de cravação, do lado interior da máquina.

Movimento B50

O mecanismo de aproximação à superfície do rotor é um mecanismo de alavanca acionado por um cilindro pneumático. O cilindro pneumático está fixo à chapa inferior da carruagem de cravação, através de dois olhais. As suas características estão descritas na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Características do acionamento B50

B50	
Características	
Tipo construtivo	Cil. Convencional, assimétrico de haste simples e duplo efeito
Energia	Pneumática
Diâmetro do êmbolo [mm]	20
Curso [mm]	50
Velocidade [mm/s]	50
Tempo [s]	1
Força de avanço [kN]	0,189
Força de recuo [kN]	0,158

A utilização de um sistema de alavanca permite obter um curso de cilindro muito reduzido para uma elevada variação de posição da roda de fricção, como representado na Figura 4.32.

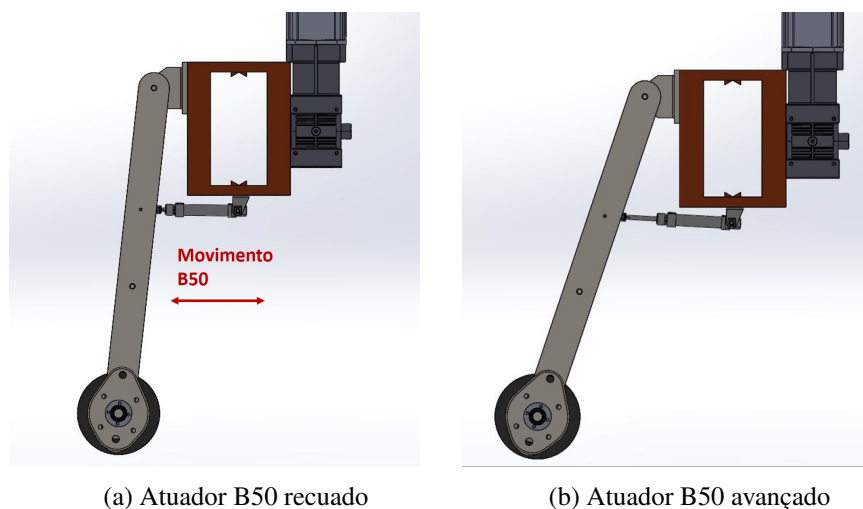


Figura 4.32 - Movimento B50

Movimento B51

Para obter uma melhor área de contacto e uma rotação mais eficiente, são utilizadas duas rodas de fricção em paralelo, acionadas pelo mesmo motor.

As rodas de fricção são acionadas por um servomotor, com um redutor acoplado, ambos montados no braço da alavanca deste sistema. Como redutor utilizado é um redutor de roda de coroa e parafuso sem fim, permite uma solução construtiva compacta, devido à saída a 90°. As características deste acionamento estão tabeladas na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Característica do acionamento B51

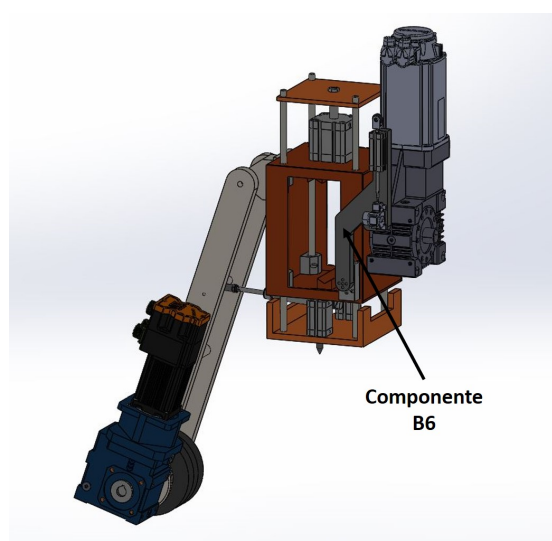
B51	
Características	
Tipo construtivo	Servomotor tamanho 40 e redutor de roda de coroa e parafuso sem fim
Energia	Elétrica
Potência nominal [kW]	0,7
Velocidade nominal [rpm]	3000
Binário nominal [Nm]	2,6
Razão de redução	97,78
Velocidade de saída do redutor [rpm]	5

4.4.6 Componente B6 - Sistema de posicionamento

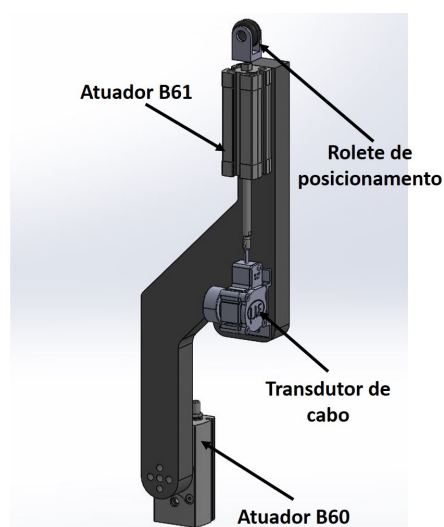
Embora o sistema de rotação possua um *encoder* incorporado, como a transmissão de movimento é feita por fricção, pode ocorrer um eventual escorregamento entre roda e rotor, o que pode comprometer o posicionamento do rotor, não garantindo o posicionamento "ranhura a ranhura".

Assim, é utilizado um sistema de posicionamento externo, que está encarregue de controlar a posição do rotor. No Capítulo 3 não foi especificado como um componente funcional, mas após a sua análise e desenvolvimento, verificou-se a necessidade de tal definição.

O sistema está incorporado na carruagem de cravação, como exibido na Figura 4.33a. Apresenta dimensões reduzidas, podendo ser fixo a uma das faces frontais da carruagem, preferencialmente aquela que se encontra mais perto do grampo onde são inseridas as barras (B3), diminuindo os possíveis erros na medição.



(a) Sistema de posicionamento montado na carruagem de cravação



(b) Sistema de posicionamento isolado

Figura 4.33 - Componente B6 - Sistema de posicionamento

A Figura 4.33b representa o sistema, identificando alguns dos seus componentes.

Movimento B60

O movimento de aproximação do sistema de posicionamento é semelhante ao utilizado para o componente B5. Contudo, este movimento é executado por um atuador pneumático angular, contrariamente ao cilindro pneumático B50. Esta solução é possível devido à reduzida dimensão deste sistema, que apesar de conter um braço de 300 mm, é consideravelmente menor que o sistema de rotação. O atuador angular está caracterizado na Tabela 4.16.

Com esta solução é possível manter o sistema na vertical, quando este não é necessário, como se pode observar na Figura 4.34, obtendo assim uma solução mais compacta e otimizando o espaço requerido.

Devido à restrição física da viga da ferramenta de manipulação, o braço do sistema de posicionamento não pode ser totalmente reto. A geometria característica deste é necessária para garantir o correto posicionamento do rolete de posicionamento, quando próximo da superfície do rotor.

Tabela 4.16 - Características do acionamento B60

B60	
Características	
Tipo construtivo	Atuador angular de pinhão cremalheira
Energia	Pneumática
Tamanho	10
Ângulo nominal [°]	180
Velocidade [rpm]	30
Binário nominal [Nm]	0.8

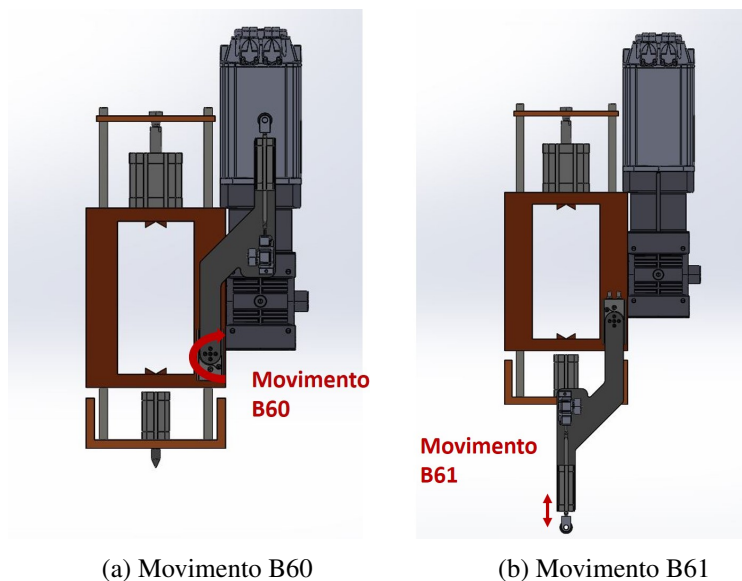


Figura 4.34 - Movimentos B60 e B61

Este tem de encostar ao rotor com o seu eixo no mesmo plano de inserção das barras, ficando alinhado com a ranhura na qual a barra vai ser inserida.

Movimento B61

Estando o sistema de posicionamento próximo da superfície lateral do rotor, o rolete de posicionamento encosta à superfície. Este movimento é realizado por um cilindro pneumático de reduzidas dimensões com um rolete de borracha fixo numa das pontas da haste, como indicado na Figura 4.34b. A Tabela 4.17 apresenta as características do cilindro B61.

Tabela 4.17 - Características do atuador B61

B61	
Características	
Tipo construtivo	Cil. Compacto, simétrico de haste passante anti-giro e duplo efeito
Energia	Pneumática
Diâmetro do êmbolo [mm]	12
Curso [mm]	40
Velocidade [mm/s]	40
Tempo [s]	1

4.4.7 Componente B7 - Batentes do rotor

Os batentes do rotor, peças que garantem o apoio da ferramenta de manipulação, foram inicialmente incorporados nos grampos. Contudo, a análise detalhada das diferentes geometrias e configurações de rotores e ranhuras demonstrou que a distância entre a superfície superior máxima de um rotor e uma ranhura pode variar de rotor para rotor. Assim, foi necessário acomodar esta nova especificação do problema, compensando a altura a que a ferramenta de manipulação fica do rotor, quando apoiada.

Estes batentes, agora componentes com posicionamento independente, possuem um movimento vertical para compensar a referida distância.

Este novo sistema contém uma estrutura própria que é incorporada em cada uma das carruagens com um grampo. Esta é designada por carruagem do batente, e o seu modelo pode ser observado na Figura 4.35.

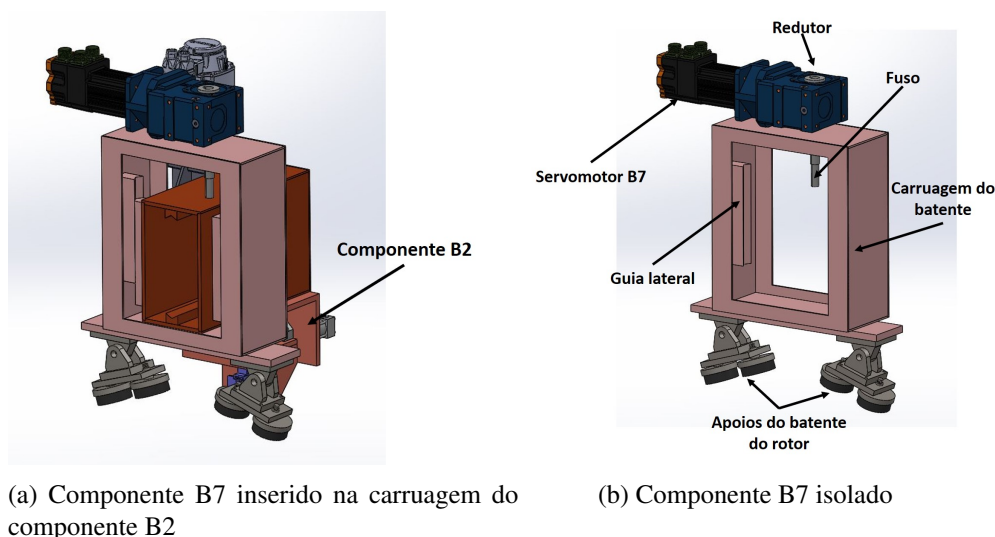


Figura 4.35 - Componente B7 - Batente do rotor

Movimento B70

As carruagens dos batentes envolvem as carruagens dos grampos, como se verifica na Figura 4.35a, movendo-se verticalmente sobre as suas faces laterais. Nas chapas laterais interiores das carruagens dos batentes e nas exteriores das carruagens dos grampos existem umas guias lineares, semelhantes às utilizadas na viga da ferramenta de manipulação, que garantem o correto guiamento deste movimento.

Este movimento é realizado por intermédio de fuso de esferas, de curso reduzido, acionado por um servomotor e redutor. Um dos extremos do fuso é fixo à superfície superior da carruagem do grampo, o outro extremo é livre e a fêmea do fuso solidária no redutor. Assim, com a rotação

do redutor, a carruagem desloca-se verticalmente através da fêmea fixa, arrastando a carruagem dos grampo, conforme exemplificado na Figura 4.36. As características do acionamento B70 estão descritas na Tabela 4.18.

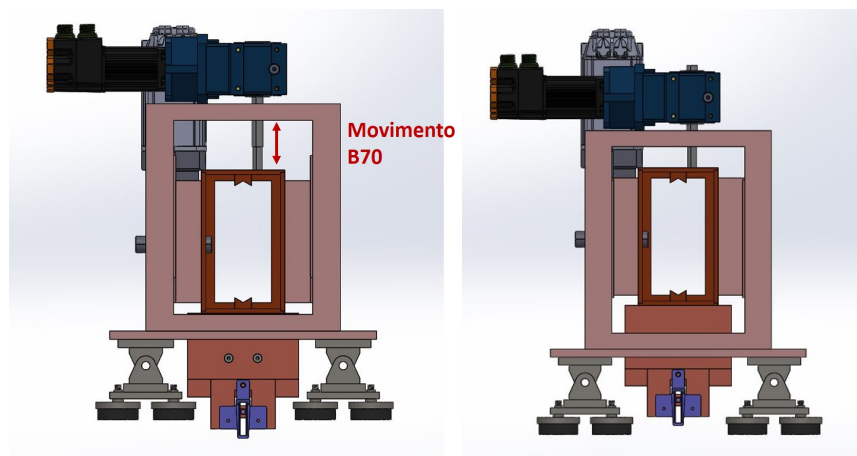


Figura 4.36 - Movimento B70

Tabela 4.18 - Características do acionamento B70

B70	
Características	
Tipo construtivo	Servomotor tamanho 40 e redutor de roda de coroa e parafuso sem fim
Energia	Elétrica
Potência nominal [kW]	0,7
Velocidade nominal [rpm]	3000
Binário nominal [Nm]	2,5
Razão de redução	6,05
Velocidade de saída do redutor [rpm]	231

Os batentes são também compostos por apoios, os pés do batente, que garantem o apoio articulado sobre a viga. Existem dois pés por cada carruagem, com superfícies de apoio duplicadas, e estas são constituídas por um disco de material adequado, permitindo o apoio na superfície do rotor, não a danificando.

Para compensar os diferentes diâmetros de rotor, estes apoios estão unidos à carruagem do batente através de dois olhais, possibilitando o seu ajuste ao rotor durante a descida da ferramenta de manipulação. Este ajuste é evidenciado na Figura 4.37

O accionamento do fuso de esferas é realizado através de um servomotor e de um redutor com saída a 90°, podendo assim ser montado na face superior da carruagem do batente, como demonstrado.

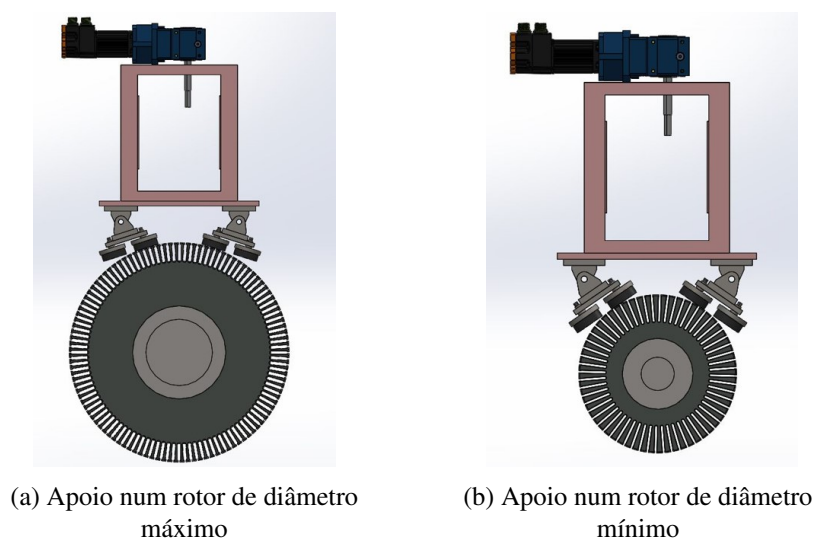


Figura 4.37 - Apoio dos batentes para rotores limite

4.4.8 Componente B8 - Esbarro móvel

O esbarro móvel é responsável pela movimentação das barras até ao componente B3 e pela sua inserção rápida no rotor. A solução desenvolvida é apresentada na Figura 4.38.

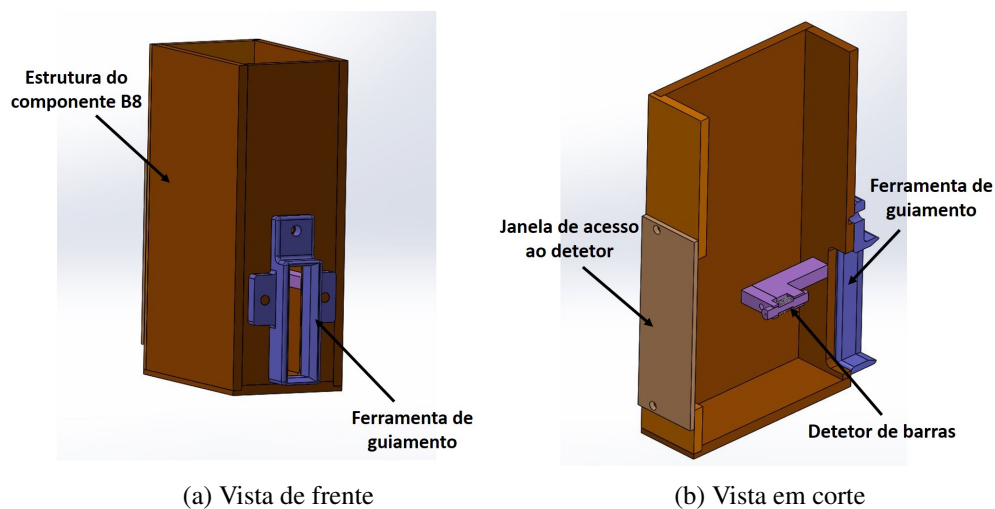


Figura 4.38 - Componente B8 - Esbarro móvel

É composto por uma carcaça metálica onde é incorporada a ferramenta de guiamento de barras. No interior dessa carcaça, existe um dispositivo de deteção de barras equivalente ao utilizado no grampo da direita, como descrito na secção 4.4.2. Este é utilizado como confirmação da correta entrega da barra desde a mesa de elevação ao esbarro móvel.

Movimento B80

Este movimento é idêntico ao movimento B13, sendo apenas distinguido pela sua função. O

movimento de inserção rápida é realizado até o limite do curso de avanço da carruagem do esbarro móvel ser atingido ou até a barra ficar retida. Caso existam dificuldades na inserção, e portanto um limite de esforço atingido, alterna-se aí para o movimento de inserção forçada.

Este componente contém uma ferramenta de guiamento idêntica à utilizada no componente B3, garantindo assim o guiamento da barra nos seus dois extremos.

4.5 Conjunto funcional C

Na Figura 4.39 é apresentada a alternativa desenvolvida para o módulo de alimentação de barras, sendo na Tabela 4.19 identificados os seus componentes e movimentos.

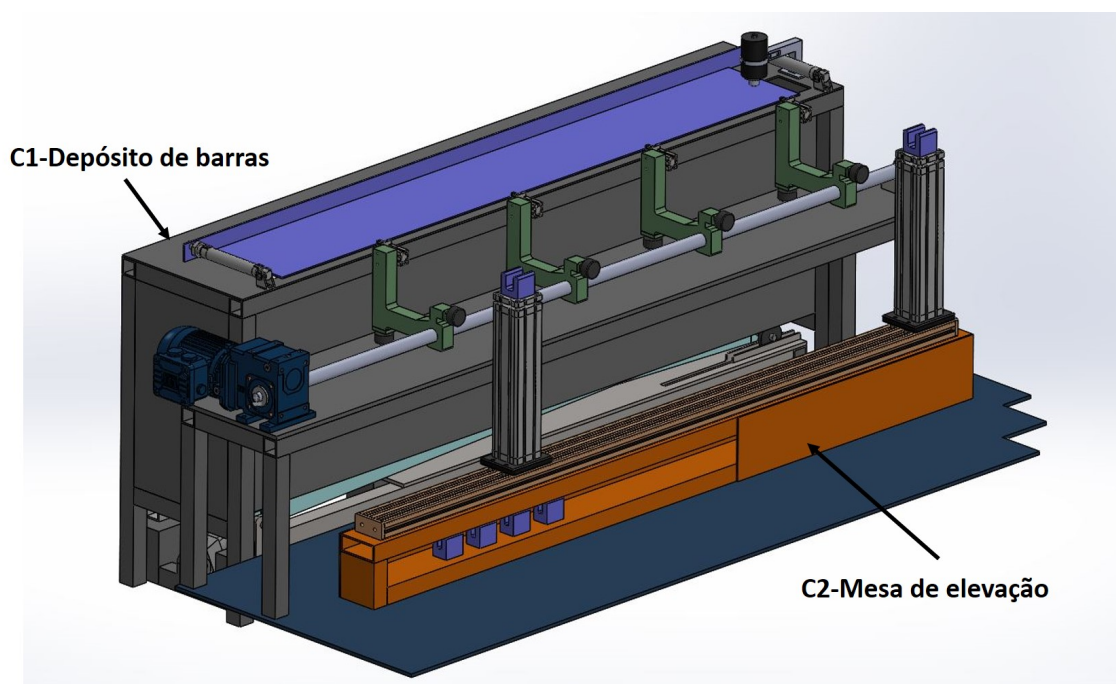


Figura 4.39 - Conjunto funcional C - solução construtiva

4.5.1 Componente C1 - Depósito de barras

No subcapítulo 3.4 foi descrita uma possível alternativa para o depósito das barras. Porém esta solução, que se baseava na descida das barras por ação da gravidade, foi considerada pouco robusta e fiável, devido às diferentes secções das barras. Estas podem nem sempre atingir a mesa na mesma posição, consequentemente comprometendo a sua posterior inserção.

Conjunto C			
Componente	Movimento	Descrição	Solução construtiva
C1	C10	Alimentação das barras no depósito	Manual
C1	C11	Mov. da mesa de tesoura	Cilindro hidráulico
C1	C12	Mov. da gaveta dispensadora de barras	Cilindro pneumático
C1	C13	Mov. de aperto das maxilas pneumáticas	<i>Gripper</i> pneumático
C1	C14	Mov. de rotação das maxilas pneumáticas	Motoredutor elétrico
C2	C20	Mov. vertical dos cilindros das pegas	Cilindro pneumático

Tabela 4.19 - Movimentos do conjunto C- solução construtiva

O depósito de barras possui uma estrutura simples, construída com tubos e chapas de aço normalizadas. Este conjunto está ilustrado na Figura 4.40.

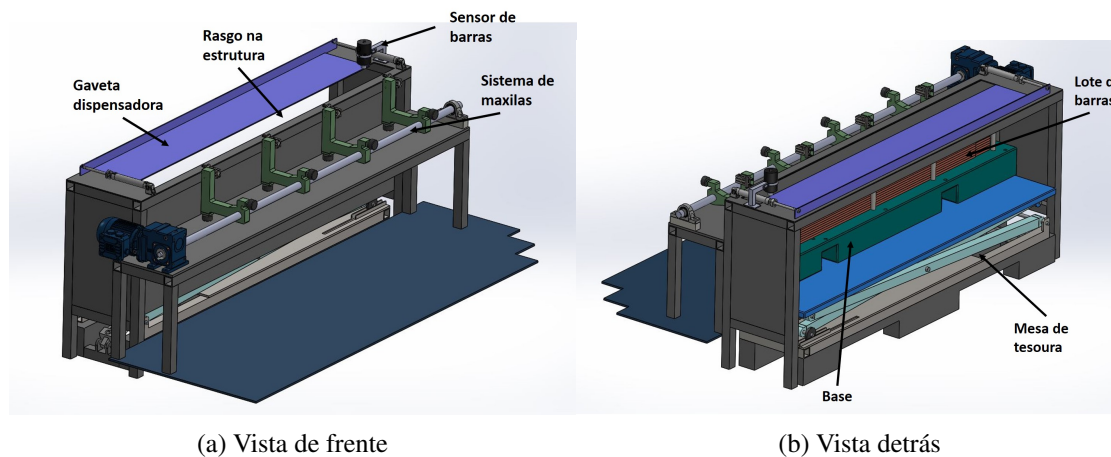


Figura 4.40 - Componente C1 - Depósito de barras

Movimento C10

A alimentação do lote de barras é realizada manualmente pelo operador através de um porta paletes. As barras são empilhadas numa base idêntica à representada na Figura 4.41, especialmente desenvolvida para a aplicação.

Esta base apresenta a dimensão adequada ao depósito das barras, sendo única para todos os modelos de barras. O correto posicionamento das barras de diferentes dimensões é conseguido mediante a utilização de uns varões que condicionam o espaço livre para a colocação de barras, adequando-o a cada morfologia, consoante exemplificado na Figura 4.42.

A base é colocada de modo a que as barras se encontrem encostadas à chapa interior do

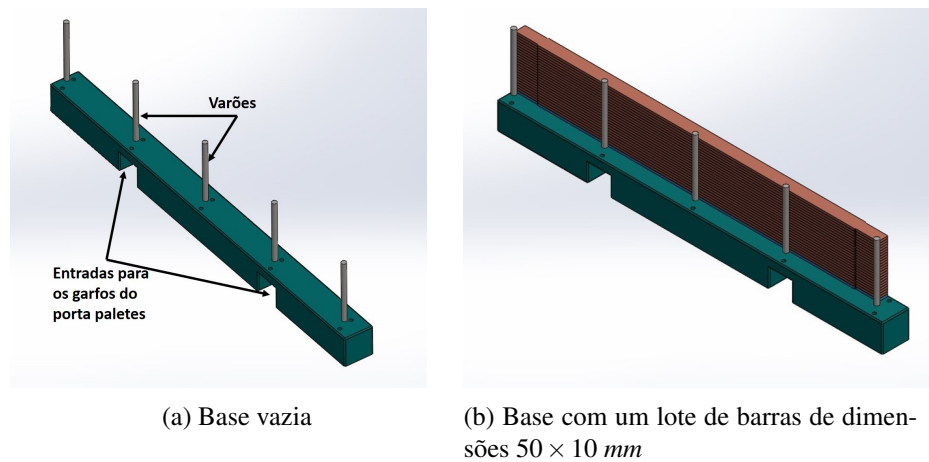


Figura 4.41 - Base de armazenamento e transporte de barras

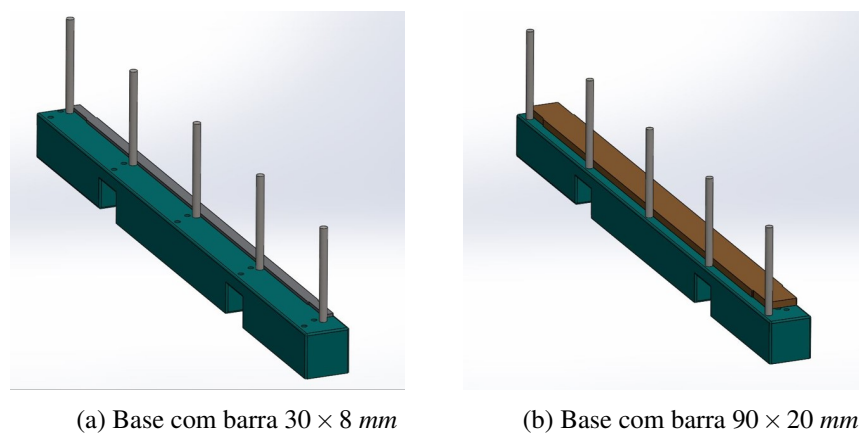


Figura 4.42 - Base com barras limite

depósito, assegurando o alinhamento com o rasgo existente na superfície superior do mesmo, ilustrado na Figura 4.43.

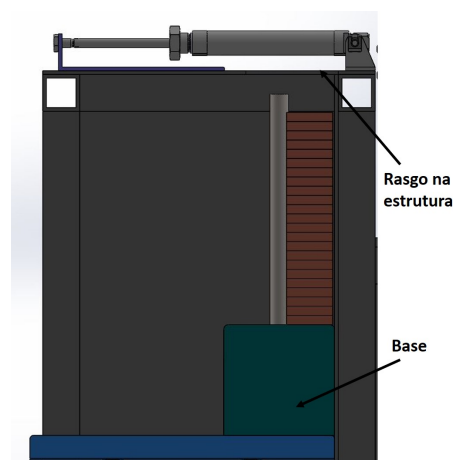


Figura 4.43 - Base inserida no depósito - vista em corte

Com a finalidade de otimizar o processo de alimentação de barras na máquina podem ser produzidas várias bases, permitindo assim que o operador carregue várias consecutivamente, podendo ficar preparadas para quando for necessário um novo carregamento da máquina.

Movimento C11

No interior do depósito há uma mesa de tesoura, especificamente desenvolvida para a aplicação, que realiza a subida das barras.

Esta é accionada por um cilindro hidráulico e pode ser observada na Figura 4.44. A mesa apresenta umas entradas inferiores para os garfos do porta paletes, possibilitando a fácil colocação das bases no seu tampo superior.

O atuador C11 está descrito na Tabela 4.20.

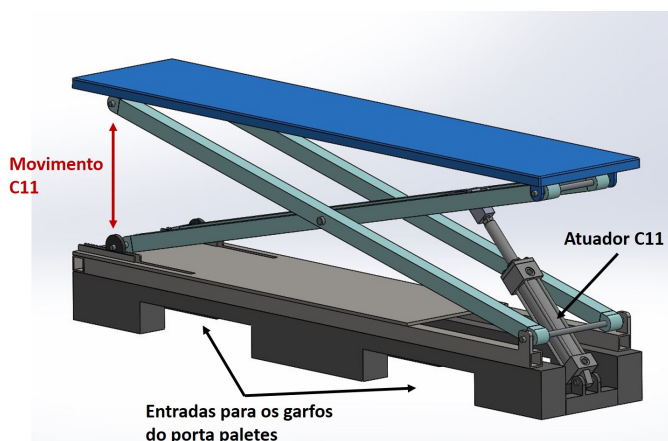


Figura 4.44 - Movimento C11

Tabela 4.20 - Caracterização do acionamento C11

C11	
Características	
Tipo construtivo	Assimétrico de haste simples e de duplo efeito
Energia	Hidráulica
Diâmetro do êmbolo [mm]	40
Diâmetro da haste [mm]	28
Curso [mm]	200
Velocidade [mm/s]	10
Tempo [s]	20

Movimento C12

Este movimento transporta as barras desde a superfície superior do depósito até umas maxilas pneumáticas posteriormente descritas. É conseguido através de dois cilindros pneumáticos, fixos na estrutura do depósito e com as hastes unidas por intermédio de uma peça, designada gaveta dispensadora, apresentada na Figura 4.45.

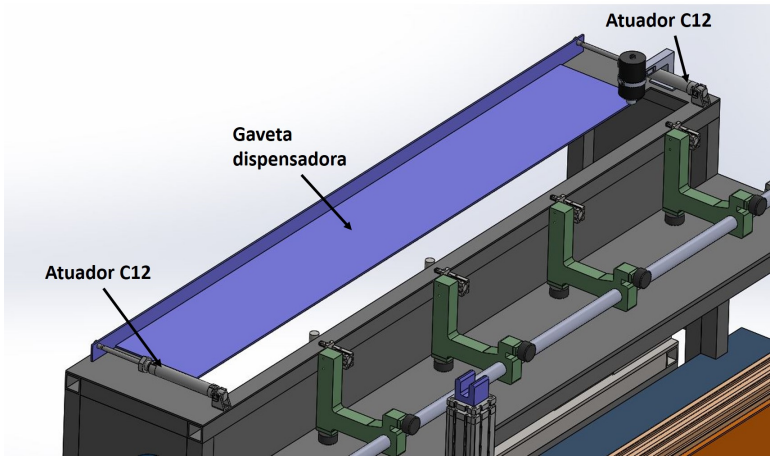


Figura 4.45 - Gaveta dispensadora

A mesa de tesoura eleva as barras até ao topo do depósito, ficando alinhadas com a gaveta dispensadora. O recuo dos cilindros pneumáticos movimenta a gaveta, obrigando a barra a deslocar-se para fora do depósito, onde é agarrada pelas maxilas pneumáticas. Este movimento está esquematizado na Figura 4.46.

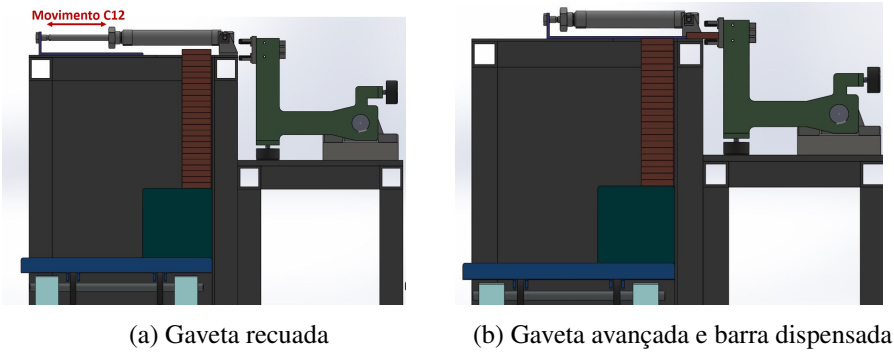


Figura 4.46 - Movimento C12

O curso dos cilindros está dimensionado para que seja possível a gaveta empurrar uma barra de largura mínima ou uma de largura máxima, realizando um curso maior no caso de uma barra mínima e um curso menor no caso de uma máxima. Os cilindros C12 estão descritos na Tabela 4.21.

Movimento C13

O movimento C13 corresponde à atuação dos *grippers* pneumáticos, também designados por maxilas pneumáticas, representadas na Figura 4.47 e caracterizadas na Tabela 4.22.

Tabela 4.21 - Características dos atuadores C12

C12	
Características	
Tipo construtivo	Assimétrico, de haste simples e duplo efeito
Energia	Pneumática
Diâmetro do êmbolo	25
[mm]	
Curso [mm]	100
Velocidade [mm/s]	70
Tempo [s]	1,4
Força de avanço [kN]	0,295
Força de recuo [kN]	0,247

São utilizados 4 *grippers* paralelos de curso longo, permitindo assim, manipular barras de espessuras entre 8 e 20 *mm*.

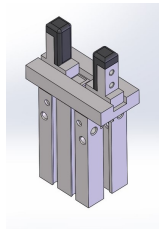


Figura 4.47 - *Gripper* C13

Tabela 4.22 - Características do atuador C13

C13	
Características	
Tipo construtivo	<i>Gripper</i> de dentes paralelos, duplo efeito, e curso longo
Energia	Pneumática
Diâmetro do êmbolo [<i>mm</i>]	16
Curso [<i>mm</i>]	12
Força de aperto por dedo [<i>kN</i>]	0,027

Movimento C14

As maxilas pneumáticas estão fixas a uns braços especiais, formando o conjunto representado na Figura 4.48. Estes realizam um movimento angular centrado num veio accionado por um motorreductor. Permite-se assim, realizar a rotação das maxilas, e consequentemente, a rotação da barra manipulada. Esta rotação coloca a secção da barra corretamente posicionada relativamente à ranhura onde vai ser inserida. Simultaneamente, desloca-a para o mesmo plano da mesa elevação, podendo assim ser entregue à mesma. A rotação das maxilas e da barra está exemplificada nas Figuras 4.49 e 4.50.

Tabela 4.23 - Características do acionamento C14

C14	
Características	
Tipo construtivo	Motorreductor de roda de coroa e parafuso sem fim
Energia	Elétrica
Potência nominal [<i>kW</i>]	0,12
Velocidade de saída do reductor [<i>rpm</i>]	14
Binário saída do reductor [<i>Nm</i>]	67
Razão de redução	63,20

Existem dois batentes mecânicos no braço de suporte das maxilas, limitando assim o curso de rotação dos mesmos, dispensando assim o uso de um servomotor.

O motorreductor utilizado é de roda de coroa e parafuso sem fim, que sendo mais compacto, evita a aplicação da solução de um reductor helicoidal, permitindo que o motor fique descentrado do veio das maxilas. Assim, não é necessário prolongar mais a superfície do depósito. Este motorreductor está descrito na Tabela 4.23.

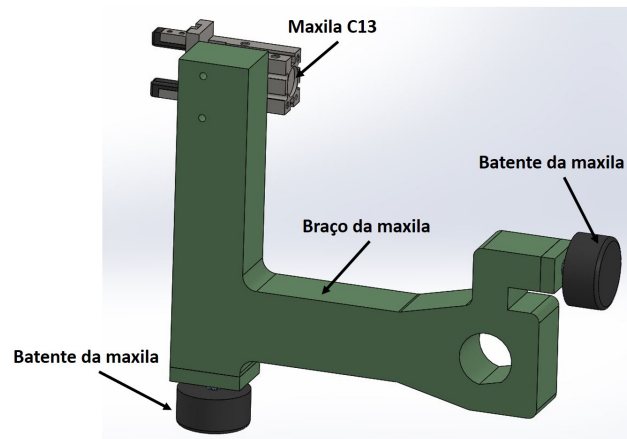


Figura 4.48 - Maxila C13 e braço

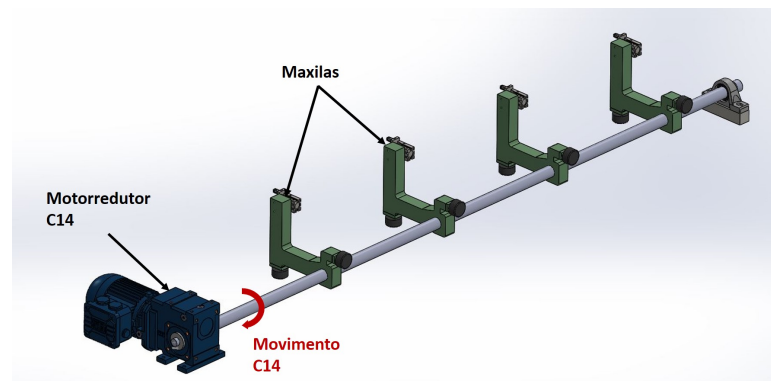
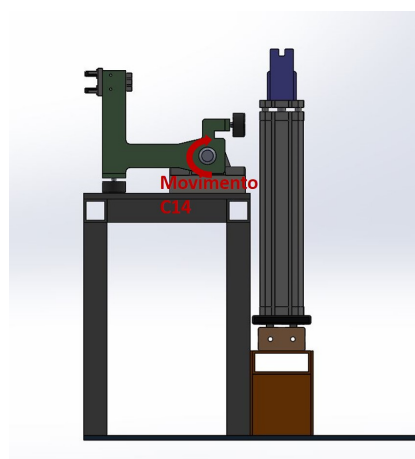
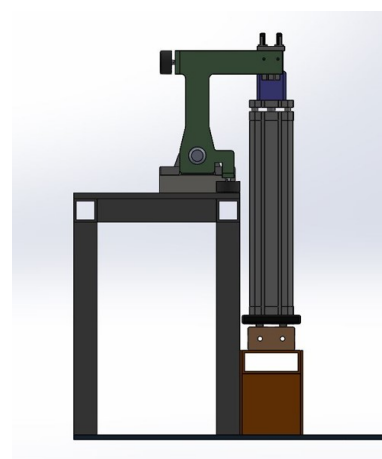


Figura 4.49 - Sistema do movimento C14



(a) Maxilas apoiadas no depósito



(b) Maxilas alinhadas com a mesa de elevação

Figura 4.50 - Movimento C14

4.5.2 Componente C2 - Mesa de elevação das barras

A mesa de elevação entrega ao esbarro a barra a inserir, recebendo-a das maxilas pneumáticas. É constituída por uma estrutura em aço e 2 cilindros pneumáticos com pegas adequadas às dimensões das barras, podendo ser observada na Figura 4.51. Esta está no mesmo plano que a ferramenta de manipulação, garantindo que a mesa só necessita de movimentar a barra verticalmente para esta ficar alinhada com a ranhura.

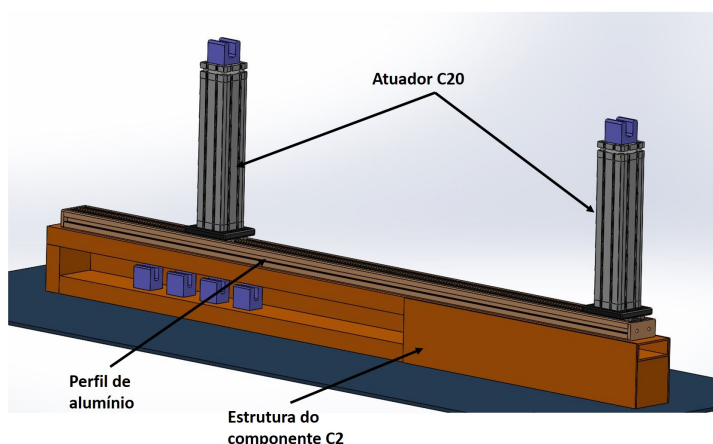


Figura 4.51 - Componente C2 - Mesa de elevação

A alternativa de um manipulador robótico para a alimentação de barras foi analisada, mas, encontrando-se o projeto numa fase inicial, esta demonstrou-se demasiado dispendiosa face à cadência de utilização prevista. No entanto, caso a utilização diária da máquina exceda o esperado, a solução desenvolvida é totalmente modular, podendo facilmente ser reanalisada.

Movimento C20

Este movimento ocorre quando a barra está suspensa pelas maxilas pneumáticas, estando pronta para ser transferida para o esbarro móvel. Os cilindros pneumáticos são atuados, agarrando a barra e elevando-a até à cota a que se encontra a guia do esbarro móvel. Os cilindros utilizados necessitam de guiamento da sua haste para evitar a sua rotação. As suas características estão apresentadas na Tabela 4.24.

Para possibilitar este movimento, as maxilas e as pegas da mesa têm de estar colocadas desfasadas, como ilustrado na Figura 4.52, evitando o seu embate.

As ferramentas colocadas nas hastes destes cilindros possuem umas pegas adaptadas a cada barra a manipular, sendo um modelo destas exposto na Figura 4.53. Estas pegas que não estejam a ser utilizadas podem ser armazenadas debaixo da mesa de elevação, sendo assim de fácil acesso.

Tabela 4.24 - Características do acionamento C20

C20	
Características	
Tipo construtivo	Cil. Compacto com guia integrada, assimétrico, de haste simples e duplo efeito
Energia	Pneumática
Diâmetro do êmbolo [mm]	63
Curso [mm]	300
Velocidade [mm/s]	100
Força de avanço [kN]	1,87
Força de recuo [kN]	1,75

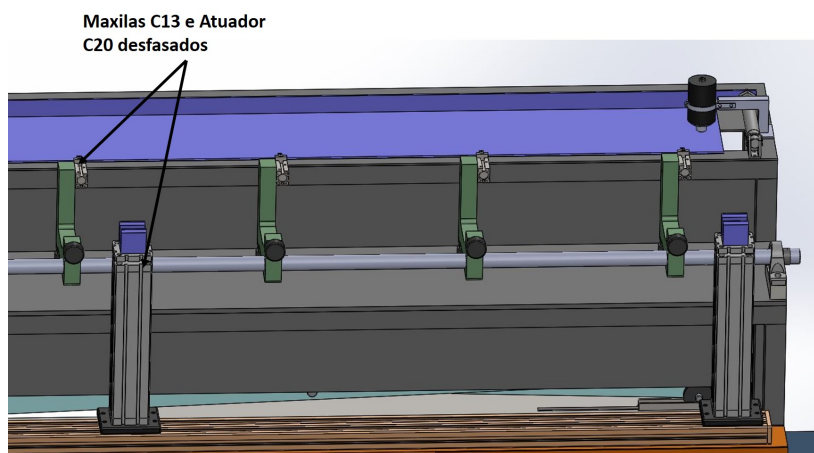


Figura 4.52 - Desfasamento entre atuadores C20 e maxilas C13

(a) Pega para uma barra de $30 \times 8 \text{ mm}$ (b) Pega para uma barra de $90 \times 20 \text{ mm}$

Figura 4.53 - Pegas para barras de dimensões limite

Em virtude dos diferentes comprimentos de barras, os cilindros necessitam de poder ser ajustados ao longo da mesa, para que seja possível manipular uma barra desde 600 mm a 1600 mm , apenas com dois apoios. Ao mesmo tempo, é requerido que uma das extremidades das barras esteja sempre numa posição fixa, de preferência o mais próximo do rotor. Os cilindros estão apoiados em peças móveis sobre perfis de alumínio, ajustáveis manualmente através de fêmeas de fixação, identificados na Figura 4.54. Só a posição do cilindro posterior é que deve ser alterada, bastando para isso desapertar e movimentar a peça de apoio e assim, ajustá-lo dimensão da barra.

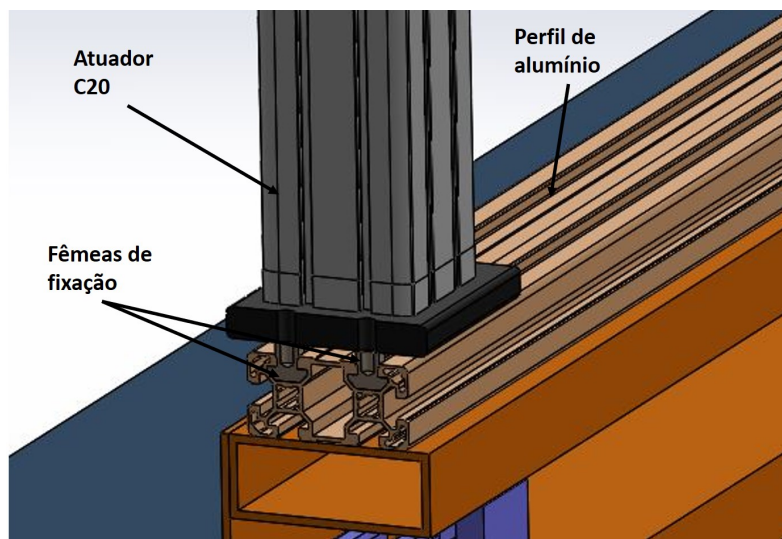


Figura 4.54 - Carruagem do atuador C20

4.6 Conclusão

Neste Capítulo, foi apresentada a solução construtiva desenvolvida e os acionamentos nela previstos, terminando assim a fase 3 mencionada no Capítulo 3. Foram expostos os pressupostos e as justificações por detrás da concepção das peças e componentes da máquina, ilustrando-os. Estes, apesar de já se encontrarem detalhadamente definidos, estão ainda sujeitos a alterações futuras de melhoria, caso necessário.

Capítulo 5

Proposta de comando

5.1 Introdução

O presente Capítulo corresponde à fase 4 do projeto, nomeadamente o desenvolvimento da proposta de comando automático da máquina, desenvolvida simultaneamente com a sua solução construtiva.

No subcapítulo 5.2 são discutidas e apresentadas as arquiteturas de comando concebidas, nomeadamente o esquema do circuito hidráulico e o esquema do circuito pneumático, sendo estes apresentados no anexo A.

No subcapítulo 5.3 é exposta e descrita a sequência de trabalho completa da máquina, sendo complementada pelos *Grafkets* comportamentais, que podem ser observados no anexo B.

No subcapítulo 5.4 é apresentada a avaliação temporal do funcionamento da máquina, detalhando o seu desenvolvimento e alguns dos pressupostos assumidos. É também realizada uma análise da avaliação temporal.

O subcapítulo 5.5 resume todo o trabalho apresentado no Capítulo, finalizando com algumas conclusões.

5.2 Comando dos movimentos

Neste subcapítulo são apresentados e descritos os métodos e os requisitos de comando dos movimentos que foram considerados a implementar na máquina para que o seu funcionamento

seja realizado e comandado corretamente, conforme os requisitos previamente enumerados. É analisado o sistema de controlo e comando de cada movimento, bem como o *hardware* necessário para o executar. Assim, este subcapítulo completa a descrição funcional realizada no Capítulo 4, identificando os meios de comando de todos os acionamentos identificados.

5.2.1 Conjunto funcional A

Movimento A30

O movimento A30, movimento de translação da viga de interligação, é realizado por dois servomotores acoplados a um redutor e convertido em movimento linear mediante um fuso de esferas. Este movimento requer um adequado rigor de posicionamento, pois é ele que garante o alinhamento entre o plano médio da ferramenta de manipulação e o eixo do rotor, situando a viga de interligação e consequentemente a ferramenta de manipulação, de modo a que seja possível a inserção das barras.

O rigor de posicionamento necessário torna inevitável o uso de um servomotor. Um esquema do sistema de controlo a utilizar está apresentado na Figura 5.1.



Figura 5.1 - Esquema do sistema de controlo do movimento A30

O comando deste sistema é realizado através do *driver* associado ao servomotor. Este deve ser capaz de assegurar não só a velocidade angular desejada para o servomotor, como também a sua posição angular final. A sua escolha foi facilitada pois o fornecedor do servomotor já indica qual é o *driver* recomendado.

Devido ao controlo em posição do servomotor, o movimento A30 pode ser assegurado com o rigor necessário para aplicação através de um sistema em malha aberta, isto é, só com o comando direto do PLC para o amplificador do servomotor. É de salientar que este movimento não necessita de ser demasiado rigoroso. A coplanaridade do eixo do rotor com a ferramenta de manipulação é dada principalmente pelos apoios do rotor.

Neste sistema existem vários fatores de perturbação que necessitam ser avaliados de modo a obter um controlo eficiente e rigoroso. Estes são:

- Folga do redutor;
- Folga do fuso de esferas;
- Características do *encoder*;
- Simultaneidade dos sistemas de controlo dos dois servomotores A30.

Para isso, uma correta calibração do servomotor e do seu *driver* é necessária, tendo em conta os fatores anteriormente referidos.

Este movimento ocorre, idealmente, somente duas vezes por ciclo produtivo, só sendo necessário o seu avanço no início do processo e o seu recuo no final.

Para este movimento se verificar é necessário o rotor já estar perfeitamente localizado na máquina, ou seja, já estar colocado nos apoios e estes já estarem ajustados ao seu comprimento. Verificando-se esta condição é necessário o *OK* do operador, confirmando que o processo da máquina pode continuar.

A posição inicial e normal da viga de interligação é imperativamente a sua posição recuada, pois o espaço vertical superior aos apoios do rotor precisa de estar sempre livre para a colocação e remoção de rotores na máquina.

O desfasamento excessivo da posição dos dois fusos de esferas pode levar a que a viga seja apoiada no rotor com uma ligeira inclinação, comprometendo todos os processos posteriores. Desta forma, o controlo rigoroso da posição da viga de interligação necessita de ser sempre garantido para que o processo de inserção se verifique sem problemas.

Os componentes de hardware de automação utilizados neste movimento são:

- Dois *resolvers* já incluídos nos servomotores;
- Dois *drivers* recomendados pelo fabricante do servomotores para o seu controlo - Servo Drive SCA06 da WEG S.A. [12].

Movimento A31

O movimento A31 é o movimento de subida e descida da ferramenta de manipulação. Este é conseguido mediante dois cilindros hidráulicos suspensos na viga de interligação. Estes cilindros, quando na posição mais superior, não podem descer por efeito da carga. Por outro lado, durante a descida têm que ter velocidades iguais. O fim do movimento de avanço corresponde à posição em que os batentes apoiem sobre o rotor, não sendo, portanto, uma posição devidamente conhecida *à priori*. O circuito hidráulico proposto está apresentado na Figura 5.2. Como se pode notar, corresponde a dois circuitos iguais, um para cada cilindro.

Para que os cilindros suportem uma carga que se encontra suspensa sem qualquer caimento, foi previsto em cada cilindro uma válvula de contrapressão, para equilibrar o seu peso e assegurar perfeita vedação. Esta válvula de contrapressão, ligada à câmara secundária do cilindro, está calibrada para uma pressão em excesso ao peso a suportar em suspensão por cada cilindro, tornado assim possível segurar com bloqueamento perfeito, sem fugas, exigindo uma pressão suficiente na câmara superior do cilindro para que o movimento se efetue.

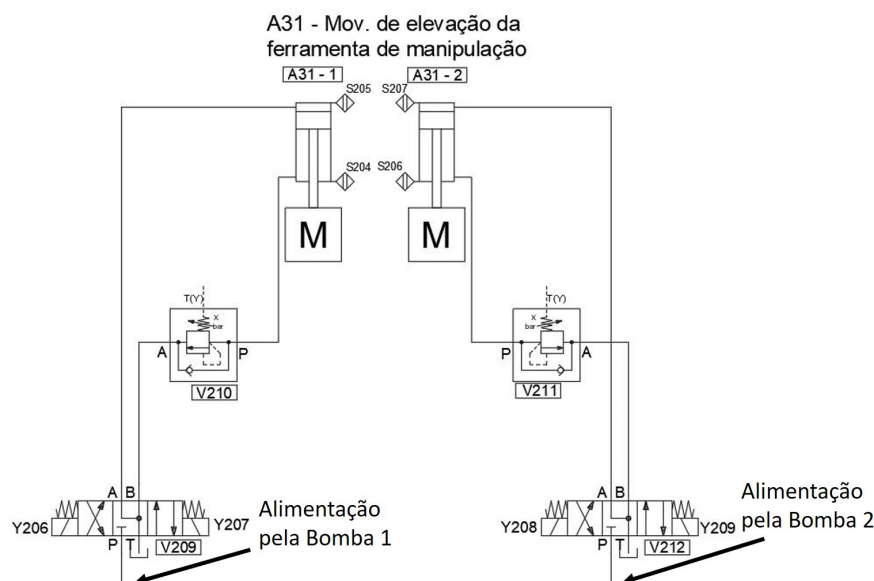


Figura 5.2 - Esquema hidráulico do movimento A31

A central hidráulica da máquina é composta por duas bombas iguais de cilindrada fixa e pode ser observada na Figura 5.3. Sendo as bombas iguais e sendo cada cilindro alimentado por uma das bombas, garante-se assim a simultaneidade nos movimentos quer de descida quer de subida.

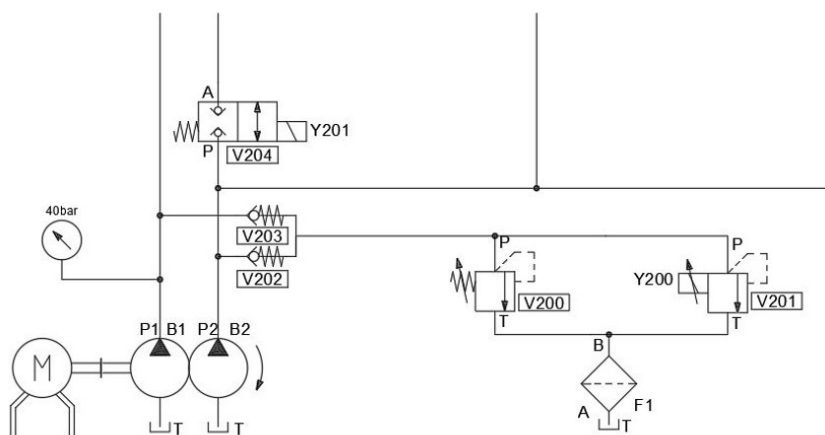


Figura 5.3 - Central hidráulica

Devido ao movimento vertical dos batentes do rotor, movimento B70, o curso realizado na descida da ferramenta de manipulação não é constante, tendo que se realizar até que a ferramenta de manipulação exerça uma força de apoio pré-determinada sobre o rotor.

Assim sendo, o avanço destes cilindros não pode ser realizado pelo simples comando das suas válvulas direccionais até que o detetor fim de curso seja atingido, pois equivaleria a um curso

constante.

A solução adotada é um comando de avanço por condição temporal, ou seja, as válvulas direcionais comandam o avanço do cilindro durante um tempo pré determinado, voltando depois para a sua posição normal. Se este tempo for calculado com alguma folga, é possível garantir que os batentes do rotor atingem a superfície do rotor.

O problema com esta abordagem é quando os batentes do rotor atingem a superfície do rotor muito atempadamente. Neste caso, enquanto o intervalo de tempo não terminar, os cilindros vão estar em carga, "empurrando" o rotor, que por sua vez, como está solidamente apoiado nos seus apoios, vai criar uma força de oposição que pode forçar a ferramenta de manipulação para cima, criando forças de flexão nos varões onde a viga de interligação está apoiada. Esta situação tem de ser totalmente evitada, pois estaria a solicitar a ferramenta de manipulação, e eventualmente toda a estrutura, a esforços para os quais não estão dimensionadas.

Deste modo, é adicionada uma válvula limitadora de pressão proporcional ao circuito hidráulico, permitindo que a descida destes cilindros seja forçada, mas a baixa pressão, só o suficiente para criar uma força sobre o rotor que não possa exceder o peso da ferramenta de manipulação que, se fosse excedido, levaria a, potencialmente, se criar uma tentativa de movimento de elevação da ferramenta de manipulação. Assim, é necessário uma correta calibração da válvula limitadora de pressão proporcional e das válvulas de contrapressão para evitar danos estruturais na máquina.

Este movimento, em condições de funcionamento automático da máquina, só é realizado com a ferramenta de manipulação posicionada corretamente por cima do rotor, isto é, depois de o movimento A30 ter finalizado.

A posição normal deste atuadores é a posição recuada, mantendo a ferramenta de manipulação sempre subida, exceto quando estritamente necessário.

Apesar do apoio dos batentes B7 ser ajustável à curvatura da superfície de cada rotor, convém que este apoio da ferramenta de manipulação seja supervisionado por um operador, só sendo necessária a sua ação caso se verifique visualmente que o apoio foi defeituoso. Nesse caso, que se prevê raro, o operador deve intervir, parando o funcionamento automático da máquina.

Neste circuito são colocados detetores de fim de curso nas posições extremas dos cilindros, apesar de só serem efetivamente utilizados os que indicam a posição recuada dos cilindros. Caso a posição mais avançada seja detetada, corresponderá a uma falha à qual deve corresponder um aviso ao operador.

Movimentos A40 e A51

Os movimentos A40 e A51 são os movimentos de bloqueio rotacional do rotor, sendo realizados por cilindros pneumáticos a partir do apoio fixo e do apoio móvel do rotor, respetivamente.

Estes movimentos são comandados através do circuito apresentado na Figura 5.4.

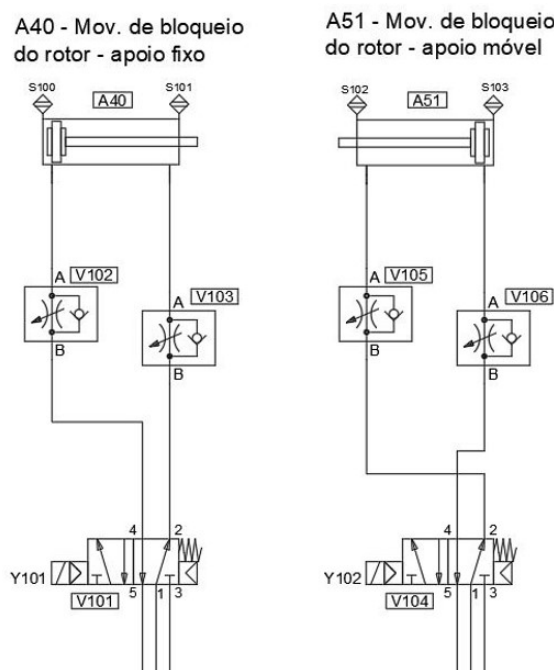


Figura 5.4 - Esquema pneumático dos movimentos A40 e A51

Os cilindros são atuados por válvulas pneumáticas direcionais convencionais 5/2 e a sua velocidade é regulada através de estranguladores em *meter-out* para ambos os casos.

Estes cilindros, colocado nos apoios do rotor, vão encostar às faces do rotor, bloqueando-o e evitando assim que este rode devido ao desequilíbrio causado pelo peso das barras já inseridas.

Como já referido, os rotores apoiados não apresentam sempre a mesma distância das suas faces ao próprio apoio, pois esta depende da construção do veio do rotor, a qual é altamente variável. Assim, os cilindros escolhidos apresentam um curso adequado ao caso mais extremo desta distância. Nos casos em que esta distância é menor, os cilindros avançam até atingirem a face do rotor. Estes cilindros, quando avançados, estão sempre em carga.

Os movimentos de bloqueio são realizados diversas vezes durante um ciclo de trabalho da máquina, sempre que é finalizada a operação de rotação do rotor. Especificamente, sempre que o movimento B51, a rotação da roda de fricção, termina. Durante as operações de manipulação e inserção de barras, compressão das chapas do rotor e cravação radial, estes cilindros estão "em carga" sobre o rotor.

A posição normal destes cilindros é a sua posição recuada, permitindo que o rotor seja colocado nos apoios sem quaisquer dificuldades.

O circuito de comando destes movimentos engloba detetores de fim de curso das posições extremas dos cilindros que correspondem à utilização de detetores magnéticos.

Movimento A50

O movimento A50 é o movimento necessário realizar, sob comando manual, para a localização do apoio móvel do rotor na posição adequada ao comprimento de cada rotor.

O circuito hidráulico deste movimento está representado na Figura 5.5.

Os apoios do rotor, como referido no Capítulo 3, têm de equilibrar algum desequilíbrio de esforço requerido em cada momento de inserção forçada de barras e de compressão de chapas. No caso do apoio fixo, isto é conseguido estruturalmente, pois este apoio é rígido e solidário com a base da máquina. No caso do apoio móvel, isto é conseguido através da utilização de uma válvula de retenção, pilotada hidraulicamente, na linha da câmara secundário do cilindro, com a sua pilotagem ligada à linha da câmara principal, como mostrado na Figura 5.5.

Este movimento só é realizado uma vez por ciclo de trabalho da máquina, sendo o primeiro movimento a ser realizado. Este movimento faz, portanto, parte da preparação da máquina para o trabalho e é assim um movimento realizado sob comando manual sensível.

O cilindro é normalmente avançado, o que significa que a posição inicial do apoio móvel é a mais afastada, isto é, a posição de apoio para o rotor de maior comprimento.

A50 - Mov. do apoio móvel do rotor

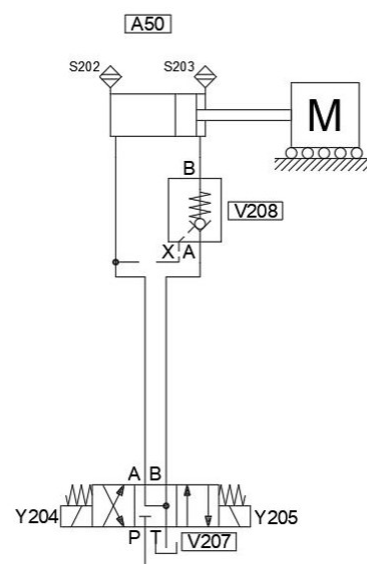


Figura 5.5 - Esquema hidráulico do movimento A50

5.2.2 Conjunto funcional B

Movimentos B10, B11, B12 e B13

Estes movimentos correspondem às translações de cada uma das carruagens instaladas na ferramenta de manipulação. São realizados através de um sistema pinhão-cremalheira, estando a cremalheira colocada na viga da ferramenta de manipulação, como descrito no Capítulo 4.

Proposta de comando

Estas carruagens deslocam-se ao longo da viga, tendo diversas posições de paragem, dependendo da função da carruagem ou das dimensões das barras e dos rotores a trabalhar. Assim, a utilização de servomotores, ao invés de motores de indução, torna-se necessária. O sistema é, portanto, composto por um servomotor, um redutor e a inerente transmissão por pinhão-cremalheira.

O controlo destes movimentos, à semelhança do movimento A30, é realizado em malha aberta, só comandando em malha fechada a posição angular multivolta do servomotor. A posição das carruagens é calculada através da posição lida pelo *encoder* do servomotor, tendo cada carruagem uma posição inicial de referência.

Para este cálculo é necessário conhecer o módulo da transmissão pinhão-cremalheira, e portanto o passo, em *mm*, correspondente ao deslocamento da carruagem quando esta se move um dente da cremalheira, e o respetivo valor de rotação do servomotor, tornando fundamental a calibração deste sistema.

Os movimentos B10, B11, B12 e B13 são movimentos realizados diversas vezes por ciclo de trabalho, especialmente os movimentos B13 e B12. Todos são executados a uma velocidade moderada, com uma aceleração no arranque e uma desaceleração na paragem rápidas, quando comparado com os outros movimentos da máquina.

Quando paradas, as carruagens estão travadas mecanicamente, pois os servomotores escolhidos contêm um freio mecânico. Este requisito é extremamente importante no caso das carruagens dos movimentos B10 e B11 (grampo da esquerda e grampo da direita), pois estas têm de tornar a ferramenta de manipulação e o rotor num só corpo solidário, e portanto, têm de resistir ao esforço realizado na inserção forçada das barras. Apesar da compressão das chapas do rotor ser realizada pelos movimentos B20 e B30, estas carruagens têm de compensar a força de oposição realizada pelo rotor, não podendo perder a sua posição.

Todas as carruagens têm algumas posições pré definidas na viga da ferramenta de manipulação. As posições podem ser distinguidas em três tipos:

- Posição de referência ou posição zero;
- Posição de aproximação ao trabalho;
- Posições de trabalho.

As posições de referências são as posições zero de cada carruagem. Sempre que se realiza o rearme da máquina é nestas posições que as carruagens devem ser posicionadas. As posições são as seguintes:

- B10 - A posição de referência desta carruagem coloca-a na sua posição mais recuada, no extremo direito da ferramenta de manipulação, encostada aos batentes mecânicos aí colocados;
- B11 - Esta carruagem tem como posição de referência a posição mais à esquerda da ferramenta de manipulação, encostada também a uns batentes;

- B12 - A posição de referência desta carruagem é relativa à posição de referência da carruagem do grampo da esquerda. A carruagem do grampo da esquerda contém um detetor indutivo que deteta quando a carruagem de cravação estiver suficientemente próxima da carruagem do grampo esquerdo, por exemplo, cerca de 50 mm. Nessa posição, o zero da carruagem de cravação é obtido;
- B13 - A carruagem do esbarro está localizada no extremo da viga da ferramenta de manipulação, encostada aos batentes finais deste movimento.

As posições de aproximação ao trabalho das carruagens são as posições adaptadas a cada rotor e barra a trabalhar. Estas são encontradas na preparação da máquina para o trabalho, no período denominado "período de ajuste dos sistemas auxiliares da máquina", que ocorre depois de o rotor ter sido corretamente apoiado e a ferramenta de manipulação movida até à sua posição de trabalho. Estas posições podem ser guardadas no autómato e utilizadas sempre que um rotor ou uma barra apresente as mesmas dimensões base, evitando assim o ajuste de posições de aproximação ao trabalho idênticas para dois rotores iguais trabalhados em períodos diferentes. As posições de aproximação ao trabalho, como todas as posições das carruagens, são relativas às posições de referência, e são determinadas da seguinte forma:

- B10 - A posição de aproximação ao trabalho da carruagem do grampo da direita é relativa à posição da carruagem do grampo da esquerda, sendo a distância entre elas baseada no comprimento do rotor e calculada geometricamente;
- B11 - A posição de aproximação ao trabalho desta carruagem é a posição que permite o contacto entre a ferramenta de compressão do grampo, quando avançada, e a face do rotor. É calculada através da distância entre a face do rotor e o local do veio onde este apoia, isto é, a distância entre a face do rotor e o apoio fixo do rotor;
- B12 - A posição de aproximação ao trabalho desta carruagem é calculada pelo mesmo método que a sua posição de referência;
- B13 - A posição de aproximação ao trabalho desta carruagem depende do comprimento das barras a inserir, e é calculada de modo a que fique a uma distância, que deve ser sempre a fixa, do cilindro móvel C20.

As posições de trabalho são as diferentes posições limite que as carruagens atingem durante um ciclo produtivo e são relativas às posições de aproximação ao trabalho para esse mesmo ciclo de trabalho.

Seguidamente, são enumeradas as condições necessárias para se verificar a ocorrência de cada um destes movimentos, a menos do período de ajuste dos sistemas auxiliares:

- B10:
 - Este movimento não se realiza fora do período de ajuste dos sistemas auxiliares da máquina.

- B11:

- Este movimento ocorre na transição da barra durante a sua manipulação, isto é, quando o esbarro móvel entrega a barra ao grampo da esquerda. Quando a barra já está elevada pela mesa de elevação e pronta a ser manipulada pelo esbarro, o grampo da esquerda recua de modo a diminuir o curso que a barra tem de realizar para ir da mesa de elevação até ao próprio grampo. Quando a barra estiver inserida no grampo da esquerda, e a mesa de elevação descida, a carruagem do esbarro e a carruagem do grampo da esquerda movem-se à mesma velocidade até a carruagem do grampo da esquerda atingir a sua posição de aproximação ao trabalho.

- B12:

- O movimento da carruagem de cravação ocorre sempre que for necessário cravar uma barra. Este movimento tem duas posições de trabalho extremas, uma próxima do grampo da esquerda e outra próxima do grampo da direita. Este movimento é realizado de uma posição de trabalho extrema até à outra e vice-versa. Assim, a cravação tanto pode ser realizada da direita para a esquerda como da esquerda para a direita.

- No caso da cravação de rotores com perfis de ventilação soldados são necessários certos cuidados especiais com o controlo e comando deste movimento, devido aos "saltos" de cravação requeridos. No entanto, o comando do servomotor do movimento B12 será realizado do mesmo modo que para o caso de uma cravação padrão, isto é, controlando a velocidade do servomotor e comandando-o para uma determinada posição. A diferença nestes casos é que a posição atual da carruagem é constantemente monitorizada para ser possível subir o cilindro do punção nas zonas de não cravação. Este controlo é descrito em maior pormenor no movimento B41.

- B13:

- Este movimento realiza-se sempre que é necessário reposicionar a carruagem do esbarro na posição de aproximação ao trabalho, depois da realização do movimento B80.

- Realiza-se também na aproximação e recolha da barra, quando ela está na mesa de elevação, que por sua vez já se encontra elevada. A aproximação é realizada lentamente, avançando a guia do esbarro até esta encaixar na barra, sendo este encaixe detetado pelo detetor na guia. A aproximação e recolha da barra envolve também o avanço da carruagem do esbarro móvel, que empurra a barra, até que esta seja inserida no grampo da esquerda, que se encontra na sua posição recuada. Quando a barra tiver sido detetada no grampo da esquerda, a carruagem do esbarro e a carruagem do grampo da esquerda avançam à mesma velocidade até a carruagem do grampo da esquerda atingir a sua posição de aproximação ao trabalho, finalizando assim a manipulação da barra e podendo iniciar a sua inserção.

Os movimentos das carruagens são movimentos de extrema importância na sequência de trabalho da máquina, sendo frequentemente utilizados. Ao analisar as suas condições de comando, controle e as funções que necessitam de cumprir, são imediatamente identificadas diversas situações de risco ou mau funcionamento possíveis. De seguida, estas são enumeradas e descritas, apresentando soluções para a sua resolução:

- B10:
 - Este movimento só é realizado dentro do período de ajuste dos sistemas auxiliares da máquina, que é supervisionado por um operador, só podendo avançar com a sua aprovação. Assim, não se prevêem situações de risco ou falhas que possam perturbar o bom funcionamento do ciclo produtivo.
- B11:
 - O movimento B11, à exceção do período de ajuste, só é realizado para efetuar a transição da barra do esbarro para o grampo da esquerda. Apesar desta transição ser uma etapa crítica do processo, e necessitar de variados métodos de prevenção de problemas, o movimento B11 em si não apresenta dificuldades notáveis, pois este apenas se realiza entre o seu fim de curso e a sua posição de aproximação ao trabalho, previamente definida.
- B12:
 - No movimento de cravação das barras é necessário garantir que esta ocorra no curso completo do rotor, dentro do valor estipulado. Assim, uma condição temporal para a realização da cravação das barras é necessária. Se a carruagem de cravação não atingir a posição de trabalho extrema para onde foi comandada dentro de um certo limite de tempo, a operação é interrompida e um aviso de falha é enviado para o autómato e para a HMI. Este intervalo de tempo é calculado pelo autómato dependendo do comprimento do rotor, da velocidade de cravação desejada e de um fator de segurança, que para os casos em que exista perfis de ventilação é necessariamente maior.
 - No caso dos rotores com perfis de ventilação não existe confirmação automática de que a cravação não foi realizada nas zonas de não cravação, sendo esta eventualmente realizada numa fase posterior ao ciclo produtivo da máquina. Assim, os valores do *encoder* que correspondem às zonas onde foi indicada uma zona de não cravação têm de ser guardados para que, na ocorrência de uma falha na cravação, possa ser realizada uma análise da cravação e uma recalibração do próprio movimento e do seu controle.
- B13:
 - No movimento de aproximação e recolha da barra, prevê-se possibilidade de não encaixar a barra na guia do esbarro ou do grampo da esquerda.
 - O encaixe das barras na guia do grampo esquerdo é então garantido geometricamente pelo correto alinhamento entre a guia do esbarro, a mesa de elevação e a guia

do grampo esquerdo. Estes três componentes, em relação à sua posição transversal ao rotor, são fixos, assegurando assim o alinhamento da barra.

– Existe ainda outra falha possível no movimento B13: a ausência de barra para inserir, provocada por uma falha não detetada no processo de manipulação. Nestes casos, a solução passa por colocar uma condição temporal para o avanço de aproximação da carruagem do esbarro móvel. Como a posição de aproximação ao trabalho desta carruagem está sempre a uma distância fixa do cilindro C20 móvel, está também sempre a uma distância fixa do extremo da barra, independente do comprimento desta. Assim, se depois do comando do avanço do esbarro móvel, um determinado período de tempo for ultrapassado sem que ocorra a ativação do detetor do esbarro, é entendido que não existe barra na mesa. Com esta solução evita-se também que a carruagem do esbarro avance continuamente, podendo colidir com a pega da mesa de elevação.

Nestes movimentos só é necessário a utilização dos *encoders* já incluídos nos servomotores e os respetivos *drivers*, que permitem controlo em posição, em velocidade e em binário (corrente). Estes servomotores são fornecidos pela empresa *Bosch*, fazendo parte dos módulos de sistemas de pinhão-cremalheira com servomotor, *driver* e redutor [13].

Movimentos B20 e B30

Os movimentos B20 e B30 são os movimentos de aperto dos grampos. Estes são realizados através de cilindros hidráulicos e vão apresentar três funcionamentos com características diferentes. As funções a cumprir por estes dois movimentos, conforme descritas no Capítulo 4, são semelhantes à exceção da função de avanço incremental da barra, função adicional, representada pelo movimento B31. O circuito de comando destes movimentos está representado na Figura 5.6. Os cilindros têm como posição inicial a sua posição recuada.

Seguidamente são enumeradas as características que estes movimentos têm de cumprir:

- Avanços simultâneos, com mesma velocidade e mesma força disponível;
- Necessidade de, no mínimo, poderem ser realizados a três níveis diferentes de força: um nível inferior para a aproximação das ferramentas de compressão do grampos à chapa de aperto do rotor, um nível médio de força para o seu encosto à chapa de aperto e para garantir que a ferramenta de manipulação e o rotor se comportam como um só corpo rígido e finalmente, um nível de força elevada para realizar a compressão axial das chapas do rotor e, no caso do movimento B31, o avanço incremental na barra durante a sua inserção forçada;
- Necessidade de retenção da sua posição.

Para garantir a simultaneidade dos dois movimentos são utilizadas duas bombas de cilindrada igual, cada uma alimentando um dos dois cilindros, idêntico ao realizado no movimento A30. Além de cumprir este requisito, a utilização de duas bombas oferece outros benefícios. Em primeiro, permite dividir as necessidades de caudal dos diversos movimentos que ocorrem

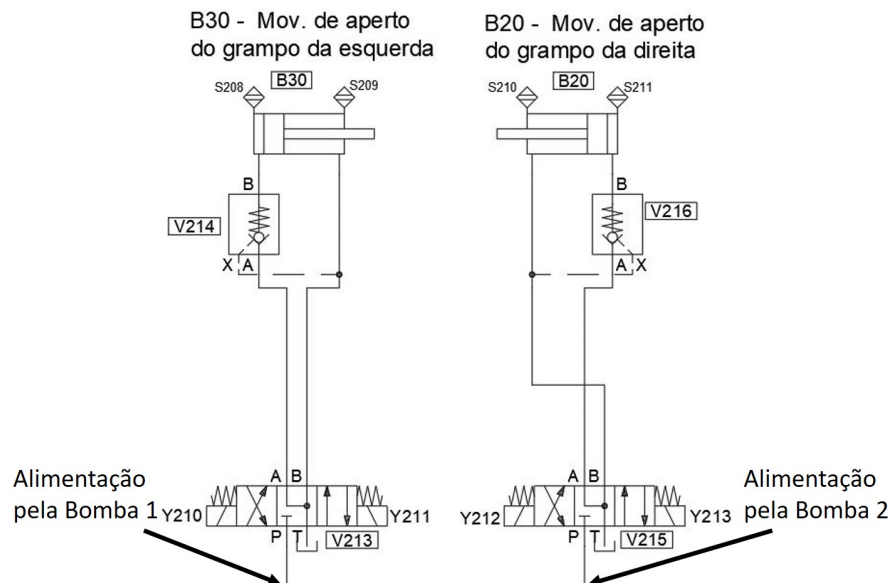


Figura 5.6 - Esquema hidráulico dos movimentos B20 e B30

em paralelo, podendo utilizar bombas com menor cilindrada. Em segundo, permite a utilização das duas bombas em paralelo, através da adição de uma válvula do tipo *on/off* de assento axial, possibilitando uma duplicação de caudal de um movimento, caso este seja necessário.

Três níveis de força diferentes, traduzem-se em três níveis de pressão do sistema diferentes. Usualmente, o valor da pressão do sistema é conseguido através da utilização de uma válvula limitadora de pressão convencional. Neste caso seriam necessárias três válvulas, uma por cada nível de pressão necessário, o que pode ser simplificado utilizando uma válvula limitadora de pressão proporcional, válvula que já foi demonstrada ser necessária para garantir as características do movimento A31. Ao utilizar este tipo de válvula, garante-se os três níveis de pressão necessários e permite-se ainda a adição de mais níveis, caso seja futuramente requerido ao sistema. As transições entre níveis de pressão, com a utilização da válvula proporcional, são realizadas mais suavemente do que com a utilização de válvulas propocionais [14]. Todas estas propriedades das válvulas limitadoras de pressão proporcionais tornam-na, nesta aplicação, uma escolha superior face às válvulas limitadoras de pressão convencionais.

A retenção dos cilindros é conseguida através da utilização de válvulas de retenção com pilotagem hidráulica, sendo estas pilotadas pela linha que alimenta a câmara secundária do cilindro, como se pode observar na Figura 5.6.

Estes movimentos não apresentam requisitos de controlo rigorosos, sendo o seu comando realizado em malha aberta.

Seguidamente, são descritos os comportamentos que estes dois movimentos devem apresentar e as condições que devem existir para as diferentes funções previamente especificadas:

- Movimento de aproximação às chapas de aperto do rotor
 - Este movimento inicia-se quando a ferramenta de manipulação já está apoiada no rotor e a barra devidamente apoiada nas guias do esbarro e do grampo da esquerda. A aproximação às chapas de aperto do rotor é realizada em simultâneo pelos cilindros. Este movimento, como já mencionado, é realizado a baixa pressão, só servindo de aproximação. O avanço dos cilindros B20 e B30 é comandado durante um determinado intervalo de tempo, evitando que haja demasiado contacto entre os grampos e o rotor.
- Movimento de encosto às chapas de aperto do rotor
 - Este movimento inicia-se quando a aproximação às chapas de aperto termina. O nível de pressão do circuito hidráulico aumenta, e o avanço dos cilindros é comandado por tempo definido. Os cilindros exercem uma força média nas chapas de aperto, ficando depois retidos a este nível de pressão, fazendo com que a ferramenta de manipulação e o rotor de um só corpo rígido se tratasse.
- Movimento de compressão axial das chapas laminadas do rotor
 - Neste caso, os cilindros já são atuados a um nível de pressão elevado. Na compressão, as chapas de aperto do rotor plastificam ligeiramente. Assim, o comando do avanço dos cilindros é realizado numa janela temporal maior do que nos casos anteriores. Quando este intervalo termina, os cilindros recuam até ao seu detetor fim de curso.

Estes movimentos, como são comandados dentro de um intervalo de tempo, têm sempre um término. Assim, nestes movimentos não é necessário um controlo temporal da execução do mesmo. No entanto, especialmente no caso do movimento executado a elevada pressão, é necessário considerar a segurança associada ao movimento, incluindo no sistema condições de paragem de emergência, caso seja detetado pelo operador a supervisionar alguma anomalia. Neste caso, os cilindros são imediatamente comandados para recuar.

Cada cilindro contém dois detetores de fim de curso, não sendo necessário mais instrumentação de medição para assegurar as funções necessárias.

Movimento B31

O movimento B31 é o movimento de avanço incremental da barra durante a inserção forçada de barras. Este movimento é realizado pelo cilindro B30, tendo o mesmo *hardware* de comando. As diferenças estes dois movimentos residem apenas na função e nas características dinâmicas exigidas.

O movimento de avanço incremental das barras tem como objetivo simular o movimento impulsivo de um martelo pneumático, forçando a barra a entrar na ranhura através da variação, idealmente instantânea, da sua velocidade, criando assim uma força de impulso capaz de ultrapassar a resistência encontrada.

Para obter estas características, o comando do avanço do cilindro B30 é realizado ao nível de pressão máximo e com o cilindro a ser alimentado pelas duas bombas, aumentando assim o caudal e a sua velocidade. Este avanço também é realizado num determinado intervalo temporal, como nos movimentos B20 e B30. A diferença, neste caso, é que o intervalo é bastante menor, conseguindo assim uma variação mais "instantânea" da velocidade de inserção da barra, simulando o impulso necessário. Imediatamente a seguir ao avanço do cilindro a pressão neste diminui, enquanto é realizado o movimento B32. Assim, a barra não fica a ser forçada durante demasiado tempo.

Este movimento só ocorre quando a máquina se encontra na fase de inserção forçada de barras. Esta fase engloba os movimentos B31 e B32, como descrito no Capítulo 4. Para o movimento de avanço B31 ocorrer é necessário o movimento B32 ter finalizado, estando a barra presa na ferramenta de aperto.

No caso do movimento de recuo, é necessário o intervalo temporal do comando de avanço terminar e o cilindro B32 recuar, de modo a libertar a barra.

O movimento B31 apresenta as mesmas necessidades de segurança que o movimento B20 e o movimento B30.

Como a inserção forçada de barras é incremental, e este movimento vai ser realizado até a barra atingir o batente no grampo da direita, não se prevêem grandes falhas associadas a esta função, pois mesmo que um dos avanços incrementais falhe, este será repetido. Evidentemente, toda a rotina de inserção forçada de barras terá um controlo temporal a ela associada, mas o movimento B31 em específico vai estar isento deste controlo.

Movimento B32

O movimento B32 é o movimento de aperto lateral da barra, durante a sua inserção forçada. O aperto lateral da barra é conseguido através da ferramenta de aperto descrita no Capítulo 4. Este circuito hidráulico de comando do cilindro está representado na Figura 5.7.

O cilindro é comandado através de uma válvula direcional 3/2 de assento axial. Este cilindro é de haste mergulhante e de simples efeito, sendo só necessário comandar o seu avanço. Como este movimento vai ocorrer ao mesmo tempo que o movimento B31, este é alimentado pela segunda bomba do sistema. Esta é outra vantagem da utilização de duas bombas idênticas no sistema, evitando utilizar uma bomba de maior cilindrada só para conseguir estes dois movimentos ao mesmo tempo.

Proposta de comando

Este movimento só funciona na inserção forçada de barras, tendo só dois estados: apertar a barra ou relaxar o aperto da barra (com ação das molas).

Para a apertar a barra, a válvula direcional deste cilindro é atuada, ficando a câmara do cilindro constantemente em pressão.

Para libertar a barra, a válvula é desatuada, voltando à sua posição inicial. O cilindro não recua totalmente, ficando só livre e desencostando as faces da ferramenta de aperto, devido à força das molas inseridas na ferramenta.

Para se verificar o avanço do cilindro B32, é necessário o cilindro B30 estar recuado e a máquina encontrar-se na fase de inserção forçada de barras.

A desaperto lateral da barra é realizado quando o movimento de avanço B31 termina.

O cilindro B32, quando não está a ser utilizado, está com a sua câmara em descarga, estando livre de se mover, caso hajam forças externas. Não é necessário o cilindro estar totalmente recuado, pois a barra ao entrar no grampo da esquerda e consequentemente, na sua ferramenta de aperto, vai obrigar o cilindro e a peça de aperto a adaptarem-se à sua posição. Isto permite não guiar e não forçar em demasia a barra, evitando assim a sua plastificação, caso alguma falha ocorra no guiamento, tendo assim a ferramenta de aperto a ajustar-se à posição da barra e não o contrário.

A solução da ferramenta de aperto previamente descrita evita que não se consiga agarrar a barra, pois é esta que define onde vai ser agarrada. Consequentemente, não se prevêem falhas associadas ao aperto da barra.

Movimento B40

O movimento B40 é o movimento vertical de aproximação de trabalho do sistema de cravação. Este movimento é realizado através de um cilindro pneumático colocado na parte superior da carruagem e que desloca uma flange que move tirantes como descrito no Capítulo 4. O sistema de comando pneumático está apresentado na Figura 5.8.

O cilindro é comandado por uma eletroválvula direcional 5/2 e a sua velocidade é regulada em *meter-out* através de dois estranguladores.

Este cilindro vai realizar o movimento sempre entre os seus dois detetores de fim de curso, só avançando totalmente e recuando totalmente. O cilindro B40 é normalmente avançado, mantendo

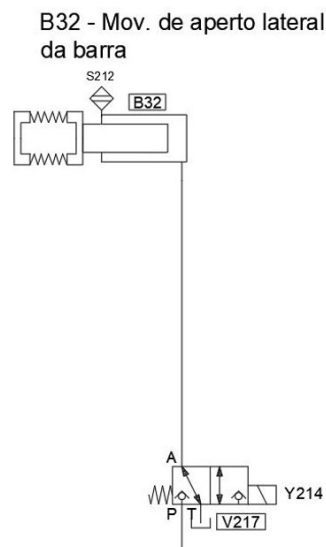


Figura 5.7 - Esquema hidráulico do movimento B32

os punções de cravação afastados do rotor, e portanto afastados da posição de trabalho.

A cravação das barras é realizada com a ferramenta de manipulação na sua posição descida, fazendo com que o curso de aproximação dos cilindros de cravação seja pequeno. Para o sistema de cravação se aproximar do rotor, através do recuo do cilindro B40, é necessário a máquina estar na fase de cravação de barras. Este movimento ocorre antes de se iniciar o movimento de translação B12, mantendo-se o cilindro B40 recuado durante toda a cravação.

Este movimento apresenta características dinâmicas pouco exigentes e de elevados valores, apresentando assim um perigo reduzido.

No caso de falha de comando, o cilindro B40 avança, afastando os punções do rotor, tratando-se portanto de uma ação segura.

No recuo do cilindro, como este pode ser impedido fisicamente por situações não previstas, haverá um controlo temporal desde o comando do recuo até à deteção do detetor de fim de curso.

Para o comando e controlo deste movimento são então necessários só os detetores de fim de curso associados ao cilindro B40.

Movimento B41

O movimento B41 é o movimento que realiza a cravação das barras. A cravação é realizada por dois cilindros pneumáticos de pequena dimensão que realizam um movimento de vaivém rápido, cravando sucessivos pontos ao longo do comprimento da barra.

Estes cilindros são comandados por uma eletroválvula direccional 5/2, com um eletroímã. A velocidade do avanço e do recuo dos cilindros é ajustada por dois estranguladores em *meter-out*, como mostrado na Figura 5.9.

Para realizar o movimento de vaivém do punção fixo à haste dos cilindros, a válvula direccional vai ser comandada por uma função temporal periódica, ao invés de comandada entre os seus detetores de fim de curso, podendo assim ajustar e variar a frequência de cravação pretendida, conforme as necessidades de produção.

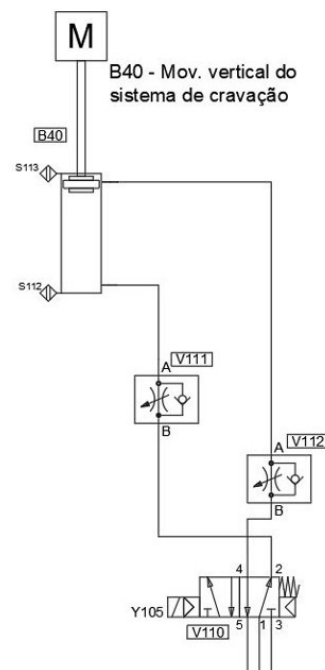


Figura 5.8 - Esquema pneumático do movimento B40

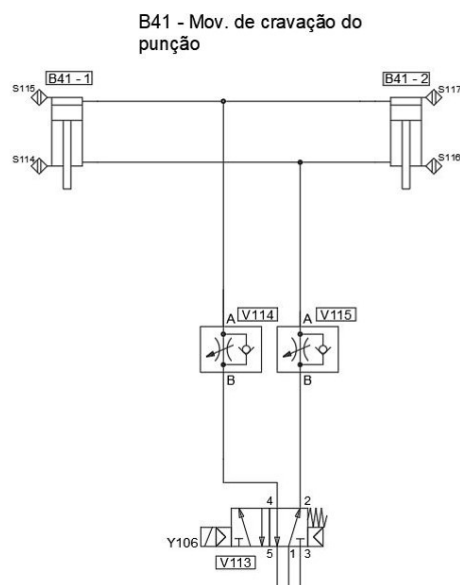


Figura 5.9 - Esquema pneumático do movimento B41

Esta função retangular não é simétrica, isto é, o tempo de comando do avanço do cilindro não é o mesmo que o tempo do comando do seu recuo, como se pode observar no esquema na Figura 5.10. Como valor inicial, propõe-se que o tempo do comando de avanço seja 60 % do tempo do ciclo de vaivém, podendo estes parâmetros ser posteriormente ajustados.

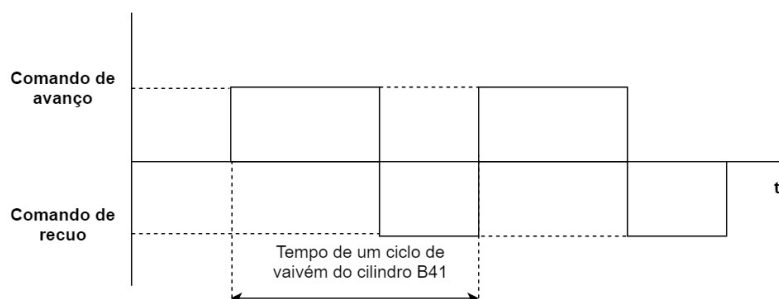


Figura 5.10 - Função de comando dos cilindros B41

É também necessário lembrar que curso dos cilindros é moderadamente maior do que a distância que estes têm de percorrer para cravar a barra.

Esta propriedade do cilindro e do seu comando aumentam a fiabilidade da cravação da barra, pois assim, estando os cilindros B41 bem posicionados, o punção atinge sempre a barra.

Na maioria dos casos, o comportamento do movimento B41 é simples, iniciando-se quando o movimento B40 termina a sua descida e terminado quando este termina a sua subida, cravando a barra ao longo de toda a sua dimensão.

No entanto, como já referido, há necessidade de em certos casos, respeitar zonas de não

cravação da barra. Nessas zonas, os cilindros B41 vão estar recuados. No início do ciclo da máquina, para um rotor que apresente esta especificidade, são introduzidas, como parâmetros da máquina, as posições destas zonas de não cravação. Durante a cravação das barras é monitorizada a posição do servomotor B12. Sempre que a carruagem de cravação se aproxime de uma destas zonas, o avanço dos cilindros B41 é interrompido, ficando os cilindros nas suas posições mais recuadas. Depois de ultrapassada esta zona, o movimento normal de cravação é retomado.

Os movimentos B41 apresentam alguns parâmetros reguláveis, permitindo calibrar os estranguladores e alterar as características do movimento de cravação. São estes os seguintes:

- Frequência da função de comando;
- Percentagem do tempo de comando de avanço relativamente ao tempo de ciclo de vaivém;
- Velocidade dos movimentos (estranguladores).

Destes parâmetros, só os relativos à função de comando é que devem ser usualmente modificados. Os estranguladores, apesar de reguláveis, depois de calibrados, não devem ser alterados, pois são modificações mais complicadas de detetar e podem trazer problemas, caso não sejam devidamente documentadas.

Para a calibração dos estranguladores foi prevista a utilização de uma função de comando que tenha o mesmo tempo de comando de recuo e de avanço, criando assim um valor de referência, que por princípio, só será utilizado para calibração. Neste movimento, que não é executado contra qualquer carga, o atuador deve conseguir atingir ambas as posições de fim de curso.

Neste movimento, não é garantido automaticamente que as barras são efetivamente cravadas, sendo essa comprovação verificada pelo operador a supervisionar ou então numa fase posterior ao ciclo de trabalho.

Neste movimento, só são utilizados os detetores de fim de curso dos cilindros B41 e os cilindros B41 são cilindros normalmente recuados.

Movimento B50

O movimento de aproximação do sistema de rotação à superfície do rotor é realizado por um cilindro pneumático assimétrico de duplo efeito. O sistema de comando deste cilindro está representado na Figura 5.11.

Este cilindro é comandado por uma eletroválvula direccional 5/2 e a velocidade dos movimentos de avanço e de recuo é regulada por estranguladores em *meter-out*.

O cilindro, quando totalmente avançado, empurra o braço do sistema de rotação, afastando-o da superfície do rotor. Esta posição avançada é a posição normal do cilindro e de todo o sistema, mantendo a roda de fricção afastada do rotor.

Quando é necessário iniciar a rotação do rotor, o cilindro recua, até a roda de fricção colidir com a superfície do rotor que, devido aos diferentes diâmetros, não ficará sempre na mesma posição.

Durante a rotação, o cilindro fica com a câmara secundária em carga, mantendo a força de contacto necessária para garantir a transmissão de movimento entre a roda de fricção e o rotor.

A aproximação do sistema de rotação requer que a ferramenta de manipulação se encontre na sua posição mais subida. Portanto, este movimento só ocorre quando os detetores de fim de curso de recuo dos cilindros A31 estiverem atuados.

As outras condições necessárias para ocorrer o movimento B50 são relativas à fase em que a máquina se encontra anteriormente, isto é, se é uma rotação durante o ajuste do sistema, durante a inserção de barras, durante a compressão das chapas laminadas ou durante a cravação das barras, estando estas especificadas nos *Graficets* no Anexo B.

Como não há verificação automática de que a roda de fricção encostou no rotor, caso esta falhe, então o detetor de fim de curso de avanço é atuado e assim é detetada a falha.

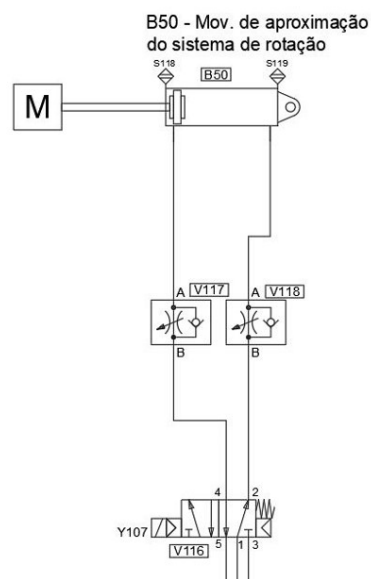


Figura 5.11 - Esquema pneumático do movimento B50

Neste movimento só são necessários os detetores de fim de curso associados ao cilindro B50.

Movimento B51

O movimento B51 é o movimento de rotação da roda de fricção, que faz rodar o próprio rotor.

Este movimento é acionado por um conjunto servomotor e redutor e é controlado em velocidade. Sendo a velocidade desejada a velocidade tangente à superfície do rotor, esta é fixa, qualquer que seja o diâmetro do rotor a trabalhar.

Apesar de se possuir possibilidade de controlar o servomotor B51 em posição, controlando assim a posição das ranhuras, esta opção de controlo não é rigorosa o suficiente, devido à possibilidade de escorregamento e de variação de diâmetro da própria roda, que é elástica, necessitando de uma medição mais rigorosa da posição das ranhuras.

Assim, como referido no Capítulo 4, o posicionamento do rotor na rotação é realizado mediante outro sistema, sendo o seu comando e controlo posteriormente descritos.

No entanto, a utilização da medição e controlo da posição angular incluída no servomotor traz vantagens para o comando da rotação do rotor, podendo controlar o servomotor a uma velocidade rápida de aproximação a uma ranhura, utilizando o *encoder* do servomotor B51 e uma velocidade lenta até à posição exata da ranhura, dada pelo sistema de posicionamento.

Para a obtenção destas posições é necessário, numa fase inicial do ciclo da máquina, realizar o ajuste do sistema de rotação e de posicionamento. Este ajuste tem como propósito a identificação do "padrão" das ranhuras no sinal dos transdutores da roda de fricção e do sistema de posicionamento e será mais detalhadamente descrita na descrição do movimento B61.

Resumindo, o controlo da posição do servomotor é utilizado apenas para uma aproximação à posição da ranhura e para melhorar as características cinemáticas da rotação da roda de fricção entre ranhuras, não podendo ser utilizado para o posicionamento rigoroso do rotor para a inserção das barras.

A rotação do rotor é realizada com a ferramenta de manipulação em cima e é dos movimentos mais utilizados durante o ciclo da máquina.

As condições para este movimento ocorrer são diversas, mas simples. Resumindo, sempre que é finalizada uma operação numa ranhura (inserção, compressão ou cravação) há necessidade da rotação do rotor. As condições transversais às três situações são:

- Ferramenta de manipulação na posição mais elevada (movimento B31 recuado);
- Roda de fricção em contacto com o rotor (movimento B50 finalizado);
- Rotor desbloqueado (cilindros A40 e A51 recuados);
- Sistema de posicionamento colocado em posição de trabalho (movimentos B60 e B61 finalizados).

Nos *Grafsets* no Anexo B é possível analisar com maior detalhe as condições específicas a cumprir para a rotação em cada caso.

O redutor utilizado é auto frenante (reductor de roda de coroa e parafuso sem fim), portanto, sempre que não utilizada, a roda de fricção encontra-se mecanicamente travada. Caso esta frenagem se demonstre não ser suficiente, está contemplado o servomotor B51 incluir freio mecânico, à semelhança dos outros servomotores utilizados, podendo este ser ativado.

Neste movimento, o escorregamento entre as superfícies da roda de fricção e do rotor, se influenciado por fatores externos não previstos, como sujidade ou humidade, pode tornar difícil a rotação do rotor. Nestes casos, a deteção da não rotação do rotor, apesar do comando do servomotor, é realizada através do sistema de posicionamento e de uma condição temporal para a rotação de uma ranhura. Se num intervalo de tempo estipulado o sistema de posicionamento não detetar o sinal de uma ranhura, então o movimento B51 não está a ser corretamente realizado.

Adicionalmente, a monitorização do consumo de corrente do servomotor permite identificar situações em que a roda se encontre bloqueada, sendo sinalizado uma aviso.

Movimento B60

O movimento de aproximação do sistema de posicionamento é realizado através de um atuador angular pneumático. O esquema do seu comando está representado na Figura 5.12.

O comando do atuador é realizado através de uma válvula direcional 5/2, e a velocidade do movimento é regulado por dois estranguladores em *meter-out*. O atuador move-se sempre entre os seus detetores de fim de curso, realizando um movimento de 180°.

O movimento B60 é bastante simples, com a única função de aproximar o cilindro B61 e o rolete de posicionamento da superfície do rotor. Quando na sua posição de trabalho, o atuador angular permanece sempre em carga, de modo a evitar desvios de posição devido a fatores externos.

Sempre que seja necessário iniciar a rotação do rotor este movimento é realizado. É de notar que este movimento só pode ser realizado se os cilindros A31 e o cilindro B61 estiverem nas suas posições recuadas.

O atuador angular, quando não atuado, encontra-se na posição que coloca o rolete de posicionamento o mais afastado da superfície do rotor e na sua perpendicular.

O movimento B60 será verificado por intervalos temporais entre a desativação de um detetor fim de curso e a ativação do outro, garantindo assim, que se ocorrer um problema neste movimento, ele é automaticamente detetado.

Movimento B61

O movimento vertical do rolete de posicionamento é realizado através de um cilindro pneumático de duplo efeito e haste dupla. O sistema de comando deste cilindro está representado na Figura 5.13.

O avanço do cilindro desde a sua posição inicial vai encostar o rolete de posicionamento, que está roscado na ponta da haste, à superfície do rotor, como descrito no Capítulo 4.

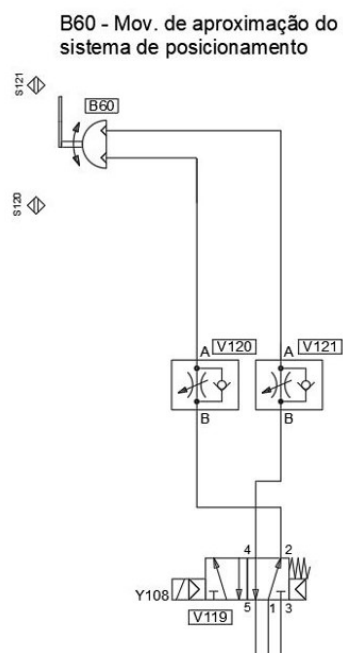


Figura 5.12 - Esquema pneumático do movimento B60

O movimento deste cilindro, apesar de simples, requer algumas características especiais para cumprir a sua função, que efetivamente, é a medição da posição angular do rotor.

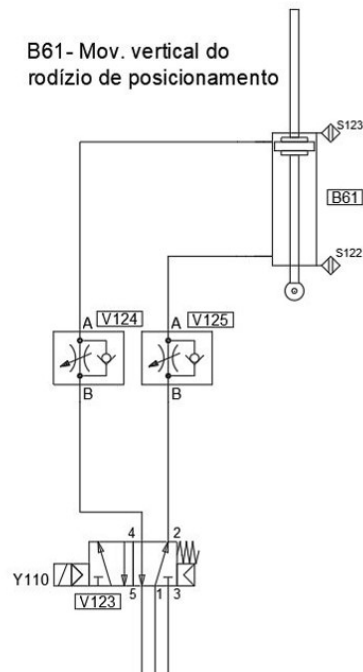


Figura 5.13 - Esquema pneumático do movimento B61

O princípio desta medição é a medição da diferença de alturas entre a superfície do rotor e o rasgo da ranhura. Durante a rotação do rotor, o rolete de posicionamento está encostado à sua face, rodando por arrasto. Se uma mola estivesse a pressionar o rolete contra o rotor, sempre que se atingisse uma ranhura, este iria deslocar-se verticalmente para se ajustar à ranhura, detetando-a assim. O princípio de funcionamento está representado na Figura 5.14.

Para obter o efeito semelhante a uma mola, é utilizado o cilindro pneumático a uma baixa pressão, através da implementação, no sistema pneumático, de uma válvula reguladora de pressão proporcional. Assim, a força com que o cilindro está a ser pressionado contra o rotor é baixa e sempre que se atinja uma ranhura, o cilindro avança ligeiramente, e recua se passar de uma ranhura para a superfície exterior do rotor.

Para medir esta variação de posição do rolete é utilizado um sensor de cabo e um cilindro de haste dupla. A ponta da haste que não está associada ao rolete de posicionamento, está disponível para ser sentida pelo sensor de cabo, como descrito no Capítulo 4, na Figura 4.33. Sempre que se atingir uma ranhura, o sensor mede a deslocação na haste oposta, correspondente à variação de posição do rolete.

As ranhuras num rotor estão localizadas igualmente espaçadas. Assim, é possível identificar o "padrão" das ranhuras para cada rotor, podendo-se estimar onde é que se vai encontrar uma próxima ranhura, eliminando variações no sinal do sensor que não estejam numa posição esperada

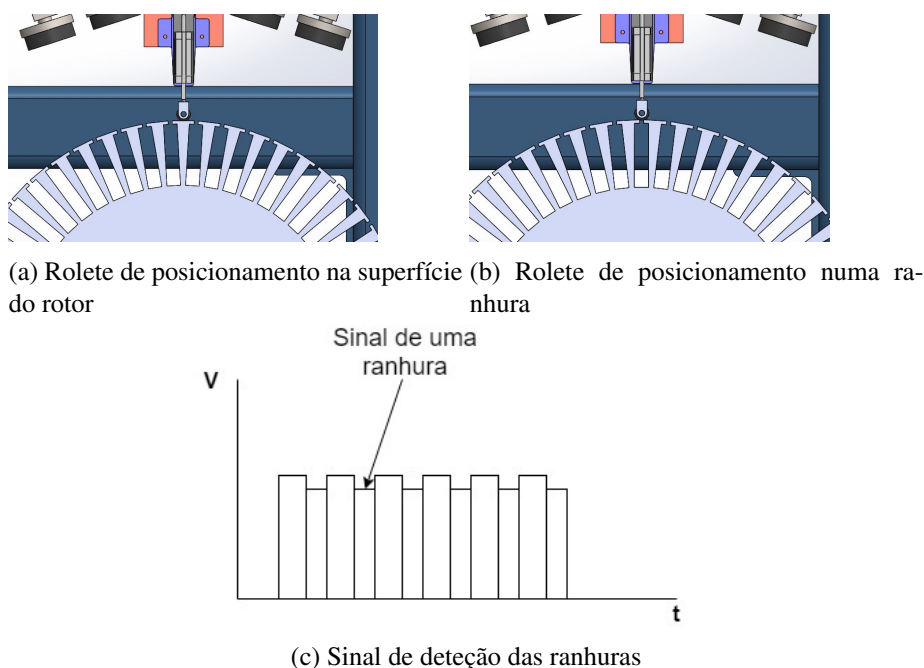


Figura 5.14 - Detecção de ranhuras

para uma ranhura, ou seja, sinais que sejam causados por perturbações externas. Esta deteção preventiva das ranhuras torna o sistema de medição e posicionamento mais robusto e menos sensível a perturbações.

No entanto, para identificar este "padrão" é necessária o ajuste deste sistema para cada rotor. O ajuste para um novo tipo de rotor é realizado no início de cada ciclo da máquina, juntamente com os outros processos de ajuste necessários para o resto dos subconjuntos. Este consiste na rotação contínua do rotor e análise dos sinais do sensor de cabo, de modo a identificar um padrão de sinais coerente, como exemplificado na Figura 5.14, que possa posteriormente ser utilizado como referência.

Este padrão, como referido na descrição do movimento B51, permite também ajustar o controlo da velocidade da rotação do servomotor B51, para obter duas velocidades, uma de aproximação à ranhura e outra até à sua posição exata, otimizando assim o processo de rotação do rotor.

O atuador B61 está normalmente com o rolete de posicionamento recuado, significando que o sensor de cabo está recolhido. Este cilindro só é atuado na fase de rotação do rotor, depois da atuação do atuador B60.

Apesar da identificação do "padrão" das ranhuras aumentar a robustez deste sistema, a medição das posições das ranhuras continua a ser um processo delicado, com algumas perturbações e falhas possíveis. O controlo deste sistema de medição e o método de identificação do padrão são

propriedades que requerem algum cuidado na sua programação, tornando o sistema mais robusto quanto mais robustas forem.

Neste sistema são utilizados dois detetores de fim de curso para o cilindro B61 e um transdutor de cabo, preferencialmente com saída em tensão, ao invés de potenciômetro, como por exemplo o sensor WPS - 50 - MK30 - U da *Micro-Epsilon* [15].

Movimento B70

O movimento vertical dos batentes do rotor é realizado por um sistema servomotor, redutor e fuso de esferas. Estes servomotores, à semelhança dos servomotores das carruagens, apresentam uma posição de referência, que será a sua posição mais recuada, isto é, a posição em que o fuso de esferas vai estar recuado.

A partir dessa posição, na fase de ajuste do sistema, é definida a posição a que os batentes têm de se encontrar para apoiar corretamente a ferramenta de manipulação no rotor a trabalhar, permitindo o alinhamento dos grampos e das ranhuras. Esta posição é denominada de posição de aproximação ao trabalho. Este movimento só é realizado, preferencialmente, uma vez por ciclo, ficando depois bloqueado na posição de aproximação ao trabalho.

Os apoios desta carruagem, como descritos no Capítulo 4, têm olhais que os permitem ajustar-se ao diâmetro do rotor. Na descida da ferramenta de manipulação estes apoios são forçados pelo rotor a irem para uma posição que permita o apoio da ferramenta de manipulação no rotor.

O ajuste das posições de aproximação ao trabalho é realizada depois de se definir as posições de aproximação ao trabalho para as carruagens na ferramenta de manipulação. Como nestas, as posições de aproximação ao trabalho do movimento B70 podem também ser guardadas para cada tipo de rotor, eliminando o processo de ajuste para rotores de dimensões que já tenham sido trabalhados. Este ajuste necessita de supervisão humana, para garantir que a ferramenta de manipulação se encontra bem apoiada.

O bloqueio da posição de aproximação ao trabalho dos batentes do rotor é conseguido através do freio mecânico existente no servomotor. Além disso, o redutor utilizado é auto-frenante, o que garante um bloqueio adicional.

Neste movimento, a posição do fuso é controlada através do *encoder* do servomotor, igual ao do movimento A30. Este é capaz de medir posição e velocidade, sendo possível definir totalmente este movimento.

Movimento B80

O movimento da carruagem do esbarro, quando executado com o intuito de realizar a inserção rápida das barras, é denominado o movimento B80, como já referido no Capítulo 4. Assim, todo o

comando deste movimento é idêntico ao movimento B13, sendo na realidade, um movimento que envolve os mesmos componentes, só se diferenciando na sua função e características cinemáticas e dinâmicas.

A inserção rápida da barra só se inicia quando a barra já está inserida na guia do esbarro e do grampo da esquerda, a mesa de elevação na sua posição recolhida e a ferramenta de manipulação descida e apoiada corretamente no rotor.

O movimento B80 é o movimento que apresenta maior probabilidade de falhas de todos os movimentos das carruagens. A possibilidade de a barra embater em alguma superfície, impossibilitando o avanço da carruagem, é o maior problema identificado. A resolução deste é conseguida mediante a seguinte abordagem.

No caso do embate físico da barra em alguma superfície, devido a um desalinhamento, é utilizada uma monitorização da corrente consumida pelo servomotor. Assim, se o valor da corrente aumentar rapidamente e significativamente, é entendido como uma colisão da barra com algum obstáculo.

Esta monitorização é também utilizada para a identificação da necessidade de utilizar o movimento de inserção forçada, quando a barra não consegue avançar mais na ranhura. Para distinguir estes dois comportamentos poder-se-á utilizar o valor da posição em que ocorrem, que será sempre significativamente diferente. Até um certo valor do movimento B80, qualquer aumento de corrente consumida no servomotor é considerado como uma colisão não prevista, antes da barra entrar na ranhura. Passado este valor de tempo, esse aumento de corrente é considerado uma dificuldade de introdução da barra, iniciando assim o movimento de inserção forçada de barras.

5.2.3 Conjunto funcional C

Movimento C10

A alimentação nas barras no depósito é realizada manualmente, através do uso de um porta-paletes. As barras são previamente carregadas em bases próprias, podendo ser carregadas várias bases com barras. Através de um porta-paletes, o operador transporta uma das bases carregada com barras e coloca-a no depósito, em cima da mesa de tesoura, encostando a base à parede do depósito. Antes de se iniciar o movimento de elevação da mesa de tesoura, o operador necessita de retirar os varões que posicionaram as barras na paleta.

A informação de que o depósito está carregado com uma base com barras e o seu número é comunicada à máquina pelo operador, através da HMI, não sendo estas detetadas automaticamente.

Movimento C11

O movimento de elevação das barras no depósito é realizado por uma mesa de tesoura, acionada por um cilindro hidráulico assimétrico e de duplo efeito. O circuito de comando deste cilindro está representado na Figura 5.15.

A elevação das barras até ao topo do depósito é um movimento que requer características específicas. Este necessita ser um movimento lento e que seja "barra a barra", isto é, só avance o equivalente à altura de uma barra de cada vez.

Para detetar as barras no topo do depósito é necessário um sensor de posição, capaz de distinguir cada barra. Para conseguir realizar esta deteção é utilizado um sistema para medir a distância entre o topo da pilha de barras e a superfície superior do depósito. Conhecendo a espessura das barras a inserir, que é um parâmetro obrigatório a introduzir na HMI no início do processo, assim como todas as dimensões das barras, pode-se calcular o número de barras que já saíram do depósito, ou, neste caso, pode-se determinar quando uma barra sai do depósito.

O princípio desse sistema de medição é muito semelhante ao utilizado na medição da posição das ranhuras - uma variação de posição de um pino metálico, medida por um sensor indutivo. Deste modo, o sistema de medição é colocado elevado relativamente à superfície superior do depósito das barras, ficando o pino metálico perpendicular a esta, e consequentemente, ao topo da pilha de barras. Este sistema pode ser observado na Figura 5.16.

As espessuras de barras, como anteriormente referido, variam entre 8 e 20 mm. Assim, para só se detetar barras, é determinado que o pino metálico, na sua posição normal, deve ficar posicionado a cerca de 6 mm da superfície do depósito, fazendo com que uma variação de posição de 2 mm no pino corresponda à deteção de uma barra de espessura de 8 e uma variação de 14 mm a uma barra de espessura de 20. Estes 6 mm também garantem que a gaveta dispensadora nunca entra em contacto com o pino metálico.

Como a espessura das barras a inserir é conhecida, dependendo do valor de espessura introduzido na HMI, o sistema de deteção de barras dá sinal de que detetou uma barra sempre que o sinal do sensor indutivo meça pela primeira vez a distância correspondente. A partir desse momento, o

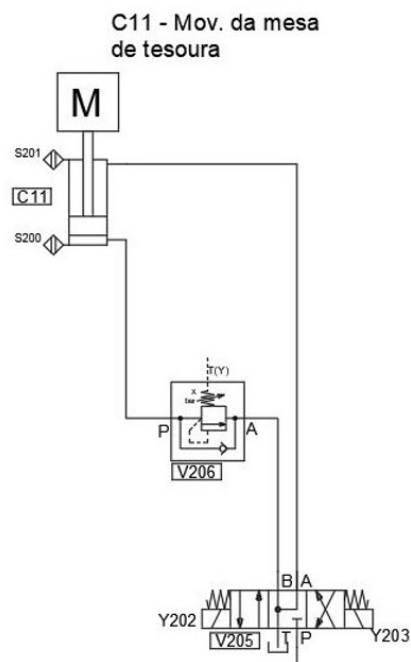


Figura 5.15 - Esquema hidráulico do movimento C11

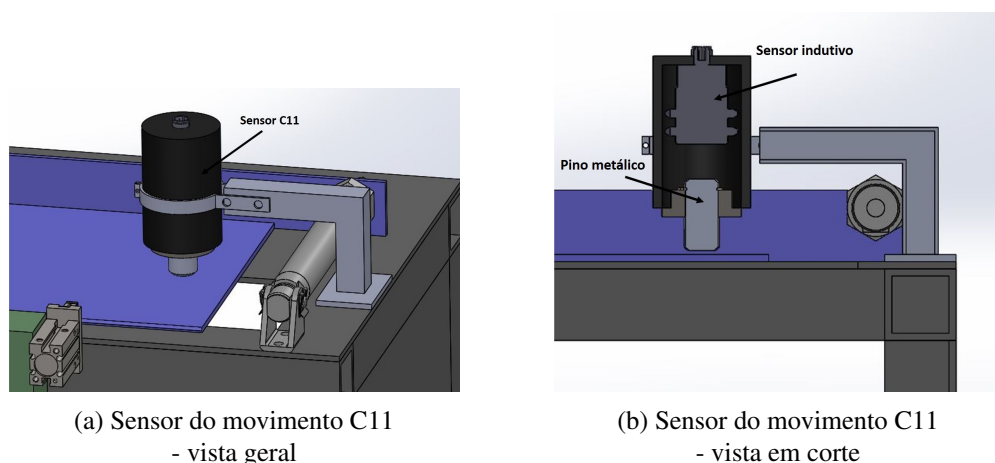


Figura 5.16 - Sensor do movimento C11

signal de detecção fica sempre ativo até que o pino volte à sua posição normal, que ocorre quando a barra é dispensada para as maxilas pneumáticas.

Assim, o comando do cilindro, quando a mesa está carregada com barras, é realizado só até o sinal de detecção ser atingido pela primeira vez desde o último *reset* do mesmo, isto é, o comando deste cilindro ocorre até à transição ascendente do sinal emitido pelo sistema de detecção de barras. Quando a mesa não está carregada com barras, o cilindro move-se entre os seus detetores de fim de curso.

Para sustentar o cilindro em cada posição de parado, é utilizada uma válvula de contrapressão, ajustada para o valor de carga máximo.

Este movimento ocorre diversas vezes durante o ciclo da máquina, sempre que é necessário inserir outra barra. Para tornar esta fase expedita, o avanço do cilindro ocorre sempre que não seja detetada uma barra no topo do depósito e que o detetor de fim de curso de avanço do movimento C12 esteja atuado, desde que já tenha sido iniciado o processo de inserção de barras. Como anteriormente referido, este avanço só é comandado até à transição ascendente do sinal do sistema de detecção de barras. Assim, a colocação de uma barra pronta a ser dispensada pela gaveta ocorre sempre que uma barra seja dispensada, evitando que o sistema fique à espera de barras.

Toda esta sequência de movimentos só acontece caso ainda não tenham sido inseridas todas as barras necessárias. Quando é a última barra a ser manipulada e retirada do depósito, a mesa de tesoura desce até à sua posição mais inferior, independentemente de a base ainda conter barras. Nestes casos, é enviado um aviso para a HMI da máquina de que o processo de inserção já atingiu a última barra.

A posição normal do cilindro da mesa de tesoura é a sua posição recuada, permitindo que a mesa possa ser carregada sempre que necessário.

Movimento C12

O movimento da gaveta dispensadora de barras é realizado por intermédio de dois cilindros pneumáticos de duplo efeito. O circuito de comando deste movimento está representado na Figura 5.17. Os cilindros são normalmente avançados, permitindo que as barras subam até ao topo do depósito.

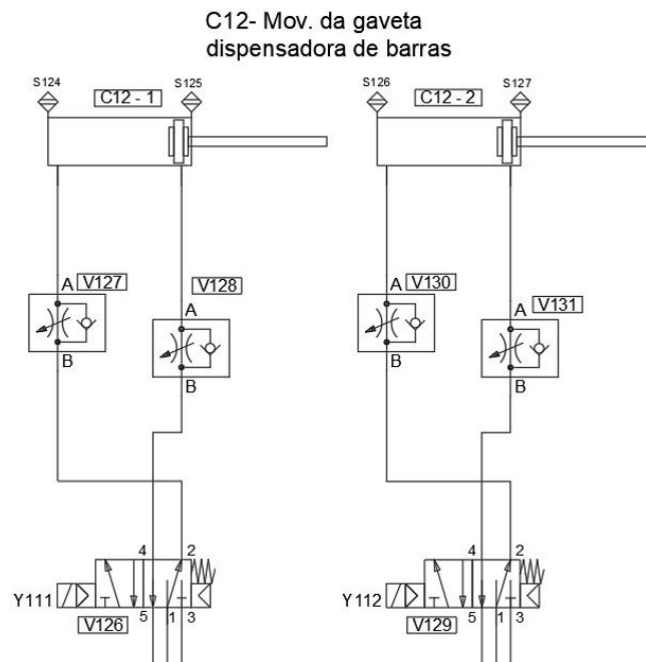


Figura 5.17 - Esquema pneumático do movimento C12

Devido às diferentes larguras possíveis para as barras, o movimento destes cilindros não pode ser realizado entre detetores de fim de curso, pois no caso das barras maiores, estas atingem as maxilas antes do cilindro atingir o fim de curso, ficando o movimento bloqueado.

Assim, o movimento será realizado durante um determinado intervalo de tempo, grande o suficiente para garantir que todas as barras atingem as maxilas. Nos casos em que a barra atinge as maxilas muito antes do final desse mesmo intervalo de tempo, os cilindros ficam em carga. Para impedir que estes danifiquem a barra ou algo componente, estes atuadores são incorporados no bloco que contém a válvula reguladora de pressão proporcional, garantindo assim que o movimento é realizado a uma pressão baixa.

A velocidade deste movimento é definida através dos estranguladores em *meter-out* à semelhança de outros comandos pneumáticos já descritos.

Este movimento ocorre uma vez por cada fase de alimentação e manipulação de uma barras. As condições para a máquina se encontrar numa determinada fase, e as fases que existem, são posteriormente descritas, em detalhe, na secção 5.3.

Dentro da fase de alimentação e manipulação de barras as condições para este movimento se verificar são:

- Uma barra ser detetada no topo do depósito;
- Os cilindros C12 avançados, encontrando-se os seus detetores de fim de curso atuados;
- Ainda não ter sido empurrada nenhuma barra durante esta fase.

Este movimento só utiliza os detetores de fim de curso dos cilindros, sendo um movimento relativamente simples onde não se prevêem falhas. Apesar disso, caso uma barra não esteja bem colocada no topo do depósito e os cilindros C12 atinjam o seu detetor fim de curso de recuo, pode ser emitido um aviso para a HMI que indique que provavelmente não foi empurrada nenhuma barra para as maxilas.

Movimento C13

O movimento C13 é o movimento de aperto da barra para esta poder ser manipulada até à mesa de elevação. Este é realizado por 4 *grippers* pneumáticos, em diversos pontos da barra. O circuito de comando deste movimento de aperto está representado na Figura 5.18. Os *grippers* pneumáticos utilizados são paralelos, de duplo efeito, contendo dois detetores de fim de curso em cada.

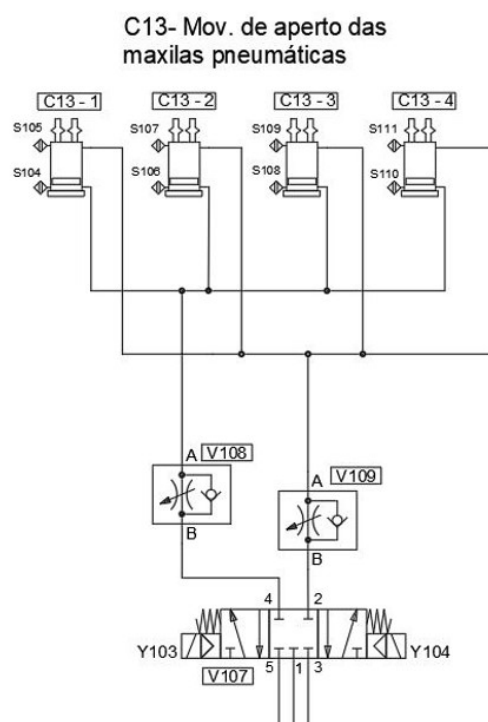


Figura 5.18 - Esquema pneumático do movimento C13

Para garantir a simultaneidade do aperto de todos os *grippers*, estes são todos controlados por uma só válvula direcional 5/3, como se pode observar na Figura 5.18.

Este movimento é realizado quando termina o movimento C12, sendo imediatamente atuado o solenóide Y104, fechando os *grippers*. Devido às diferenças de altura das barras, as maxilas não atingem o fim de curso de fecho e, portanto, não vão ser comandadas entre as posições de fim de curso. Quando comandas para fechar, as maxilas mantêm-se em carga, garantindo que a barra está apertada, independentemente da posição em que se encontram.

O movimento C13 partilha as mesmas condições para ocorrer que o movimento C12, sendo estes dois, no entanto, sequenciais. Assim, o movimento C13 ocorre quando o movimento C12 termina, e as maxilas ficam atuadas durante o movimento C14. Depois de finalizado o movimento de avanço do movimento C14, a válvula direcional das maxilas move-se para a sua posição média, ficando as maxilas livres, mas na posição ajustada à barra. Assim, é possível retirar a barras das maxilas facilmente com o avanço dos cilindros C20, estando estas livres, mas com a orientação correta.

Caso as maxilas fechem sem uma barra nelas ter sido colocada, derivado de um problema no movimento C12, os detetores de fim de curso associadas a elas ficam ativos. Só no caso das barras mais finas, de 8 *mm* de espessura, é que este detector de fim de curso é ativado com a barra na maxila.

Movimento C14

O movimento C14 é a rotação da ferramenta que contém as maxilas pneumáticas. Este movimento é realizado por um motor elétrico de indução trifásico, acoplado a um redutor.

Os movimentos são terminados quando os detetores de fim de curso são atingidos. No entanto, o posicionamento final da ferramenta é definido por batentes mecânicos colocados nas duas posições extremas, como descrito no Capítulo 4.

Este motor requer um comando que permita rotação em ambos os sentidos, a velocidade constante.

O movimento de avanço é o movimento de rotação desde o depósito até à mesa de elevação, iniciando-se este quando os cilindros C12 já se encontrarem recuados. Quando atingida esta posição, o motor ficará aí bloqueado. A capacidade auto-frenante do redutor escolhido, associada aos batentes mencionados, é suficiente para manter as maxilas na posição pretendida.

O movimento de rotação inverso ocorre quando o movimento C20 é finalizado, sendo necessário alterar o sentido de rotação do motor C14. A posição das maxilas é garantida também através dos batentes mecânicos.

A posição inicial das maxilas é a posição mais próxima do depósito, onde são recebidas as barras.

Movimento C20

O movimento da mesa de elevação é efetuado através do avanço simultâneo de dois cilindros pneumáticos, que estão normalmente recuados. O circuito de comando destes cilindros está representado na Figura 5.19.

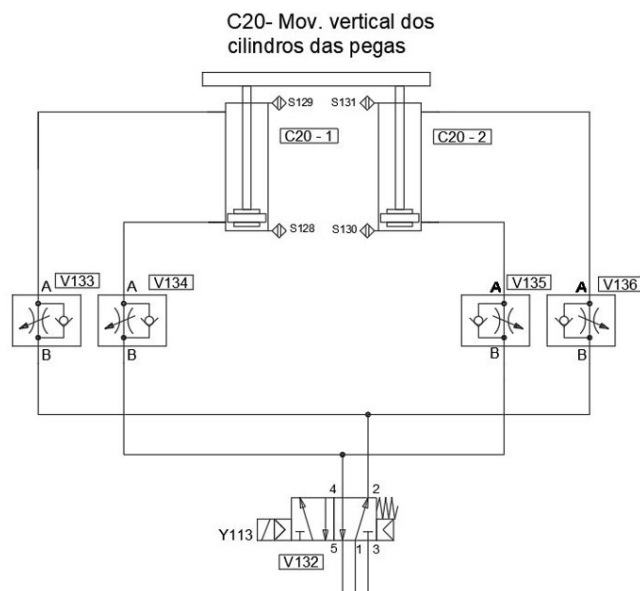


Figura 5.19 - Esquema pneumático do movimento C20

Para garantir a simultaneidade dos cilindros, estes são comandados pela mesma válvula direcional.

O movimento de elevação da mesa é simplesmente o movimento de avanço destes cilindros. Este movimento inicia-se quando terminar o movimento C14. O avanço dos cilindros é realizado a uma velocidade baixa, e ao embater na barra, a barra fica nas ferramentas que se encontram nas pontas destes cilindros, pois a barra, como anteriormente mencionado na descrição do movimento C13, não está fixa nas maxilas, estando estas com a válvula direcional na posição média. O avanço dos cilindros é realizado até aos seus detetores fim de curso.

A transição da barra das maxilas pneumáticas para as pegas da mesa de elevação é uma etapa delicada, onde podem ocorrer algumas falhas, sendo a falha principal a queda da barra. Neste caso, apesar de a probabilidade de esta falha ocorrer ser reduzida devido à geometria adaptada à barra das pegas de elevação, não existe sistema automático que notifique este comportamento não pretendido.

No entanto, este problema é localizado no movimento B80, como já referido na descrição deste movimento. Quando o esbarro móvel se aproxima para a apanhar a barra, se a barra tiver caído, o detetor do esbarro nunca é ativado, e assim, o problema é detetado, emitindo um aviso e fazendo parar o ciclo de trabalho até nova ordem do operador.

5.3 Sequência de trabalho

A sequência de trabalho da máquina está dividida em diversas fases gerais, posteriormente identificadas pela sua ordem de ocorrência:

- **Fase de Setup** - Fase de preparação e configuração das peças substituíveis da máquina;
- **Fase de ajuste manual do apoio móvel;**
- **Fase de ajuste dos sistemas auxiliares da máquina** - Ajuste das posições das carruagens da ferramenta de manipulação, do sistema de posicionamento e da posição dos batentes do rotor, tudo adequado ao rotor a trabalhar;
- **Fase de trabalho automático da máquina.**

Em seguida, é enumerada a sequência normal de trabalho da máquina, destacando as diversas fases. Esta sequência de trabalho é baseado nas etapas dos *Graficets* comportamentais da máquina, apresentados no anexo B, facilitando assim a sua compreensão.

1. **Fase de Setup** que envolve:

- (a) Leitura dos dados de definição do processo: dados máquina, dados do rotor a trabalhar e dados das barras a trabalhar;
- (b) Substituir as peças superiores dos apoios do rotor para as correspondentes ao tipo de rotor a trabalhar;
- (c) Substituir as ferramentas de compressão dos grampos;
- (d) Substituir a ferramenta encarregue de apertar a barra no movimento B32 de inserção forçada;
- (e) Substituir as ferramentas de guiamento do esbarro móvel e do grampo da esquerda;
- (f) Substituir os apoios das barras na mesa de elevação e ajustar a sua posição;
- (g) Ajustar posição do cilindro móvel C20.

2. **Fase de ajuste do apoio móvel** sob comando manual sensitivo;

3. Colocação do rotor nos apoios mediante uma ponte rolante - *Ok* do operador;

4. Ferramenta de manipulação avança para a posição de trabalho;

5. **Fase de ajuste dos sistemas auxiliares da máquina** que envolve:

- (a) Ajuste das posições de aproximação ao trabalho para as quatro carruagens da ferramenta de manipulação - posição dependente do rotor a trabalhar;
- (b) Ajuste dos sistemas de rotação e de posicionamento - Ajuste do "passo" de rotação (equivalente a uma ranhura do rotor) e identificação do "padrão" dos sinais correspondentes as posições das ranhuras;
- (c) Ajuste das posições de aproximação ao trabalho dos batentes do rotor;

6. *Ok* do operador relativamente ao ajuste dos sistemas auxiliares;

7. Carregamento manual da base com barras no depósito;
8. *Ok* do operador e início da **Fase de trabalho automático da máquina**;
9. Ranhura é alinhada automaticamente, através da rotação do rotor, por roda de fricção. Como definido no *macrografcet* M2, a rotação do rotor nesta fase é realizada de 90 em 90 graus. Simultaneamente, uma barra é alimentada na mesa de alimentação e colocada na posição pronta a inserir;
10. Inserção da barra;
11. Repetição dos passos 9 e 10 até todas as barras estarem inseridas no rotor;
12. Compressão das chapas de todas as ranhuras. Este processo envolve outro ciclo de rotação do rotor, ranhura a ranhura;
13. Cravação radial de todas as barras. Este processo envolve outro ciclo de rotação do rotor, ranhura a ranhura;
14. Ferramenta de manipulação move-se para a posição recuada e o processo está finalizado, podendo o rotor ser retirado da máquina através de uma ponte rolante.

Os *Grafcets* comportamentais apresentados no anexo B são relativos ao comportamento normal da máquina. Este comportamento é baseado num *grafcet* geral, sendo os diversos processos específicos da máquina representados por *macrografcets* de menor dimensão. Assim, divide-se o comportamento da máquina em vários processos, facilitando a leitura e tornando o mapeamento mais fácil.

A sequência de operações da máquina é representada pelos seguintes *grafcets*:

- *Grafcet* principal - Sequência geral da máquina;
- *Macrografcet* M1 - Ajuste dos sistemas auxiliares;
- *Macrografcet* M2 - Rotação do rotor na inserção;
- *Macrografcet* M3 - Manipulação de barras no depósito;
- *Macrografcet* M4 - Manipulação de barras na mesa de elevação;
- *Macrografcet* M5 - Inserção de barras;
- *Macrografcet* M6 - Rotação do rotor na compressão e na cravação;
- *Macrografcet* M7 - Compressão das chapas do rotor;
- *Macrografcet* M8 - Cravação das barras.

5.4 Avaliação temporal

No âmbito do estudo prévio desenvolvido para este projeto, desde a definição da solução construtiva à definição do comando e funcionamento da máquina, é ainda realizada uma avaliação temporal da *performance* da máquina, para poder analisar a sua viabilidade e, eventualmente, recolher informações de funções e conceitos a melhorar. Este estudo permite a demonstração da

viabilidade funcional e de desempenho temporal da máquina à WEG S.A., sendo uma ferramenta importante para o diálogo relativamente à concretização do projeto.

O método adotado para a realização deste estudo foi baseado nos *grafcets* elaborados, servindo estes de base para a organização da própria análise, refletindo assim o correto comportamento da máquina em trabalho, tornando o estudo o mais real possível. O tempo que é necessário para executar cada etapa dos *grafcets* é estimado, dependendo de diversos parâmetros externos pré-definidos e, no final, o tempo de todo o ciclo da máquina é calculado, somando os tempos calculados para cada etapa, e seguindo sempre o funcionamento exemplificado pelos *grafcets*. Em geral, o tempo de cada etapa é calculado através dos cursos de cada movimento associado a uma etapa e para as velocidades previstas.

Para isso, foi desenvolvida uma ferramenta no *software Microsoft Excel* onde foram "planificados" os diversos *grafcets*, permitindo analisar os tempos da máquina etapa a etapa. Foi escolhida esta ferramenta devido à facilidade da sua utilização e simplicidade de calcular e organizar os diversos tempos de todas as etapas para todos os *grafcets*.

Foram criadas diversas folhas de *Excel*, cada uma refletindo um dos *macrografcets* desenvolvidos. Seguidamente estas são identificadas:

- Folha "Parâmetros e avaliação temporal": Folha principal onde estão os resultados da avaliação temporal e onde são adicionados os parâmetros gerais externos da máquina, como por exemplo, as dimensões do rotor e das barras a trabalhar;
- Folha "*Grafcet* Principal": Folha onde está "planificado" o *grafcet* principal e apresentados os tempos calculados para cada uma das suas etapas;
- Folhas "M1" a "M8": Folhas onde estão "planificados" os diversos *macrografcets*. Ne-las estão apresentados os tempos calculados para as etapas, dependendo das velocidades e dos cursos dos movimentos de cada uma. Estão também apresentados alguns parâmetros específicos de cada *macrografcet*;
- Existe ainda uma folha adicional, designada "Legenda", com alguns comentários sobre a organização das células, tabelas do documento e as unidades utilizadas. As unidades padrão utilizadas, exceto quando indicado, são as seguintes: $[mm]$, $[s]$, $[mm/s]$, $[rpm]$, $[^{\circ}]$.

Seguidamente, cada folha é analisada, explicando o seu desenvolvimento e correta utilização. As imagens das tabelas são também apresentadas. Os valores contidos nas tabelas são valores para a avaliação temporal do ciclo produtivo de um rotor de 660 *mm* de diâmetro, 1500 *mm* de comprimento e 54 barras, com dimensões de 1600x90x20 *mm*.

5.4.1 Parâmetros e avaliação temporal

Esta folha é a folha principal de todo o documento de *Excel*. Nela são inseridos todos os dados e parâmetros para se poder realizar uma avaliação da máquina para um rotor específico. Estes parâmetros são denominados gerais, e ao contrário dos parâmetros específicos das outras folhas, estão apresentados na folha principal, pois são, maioritariamente, os dados externos à máquina que provêm diretamente do *software* de gestão da fábrica, ou que são inseridos na HMI pelo operador em cada ciclo produtivo.

O tempo total de um ciclo de trabalho, e consequentemente, todos os tempos de outros *grafcets*, foram calculados tendo em atenção todas as operações em paralelo, isto é, nas etapas que estejam inseridas num "E" lógico só conta o tempo do caminho mais longo. Um exemplo é as operações dos *macrografcets* M2, M3, e M4 no *grafcet* principal, onde só conta para o tempo total do ciclo o valor maior entre o tempo de realização de M2 e as somas dos tempos de M3 e M4.

Foram também realizadas diversas pequenas tabelas com os tempos totais de diferentes operações da máquina, permitindo analisar não só o tempo de trabalho total da máquina, mas a influência das operações mais importantes. É de notar que na tabela "% de diversas operações no tempo total da máquina", na linha "Rotação do rotor" só é contabilizada as rotações durante as operações de compressão das chapas e de cravação das barras. O tempo da rotação do rotor durante a inserção das barras é suprimido pelo tempo da manipulação das barras, pois estas operações são realizadas simultaneamente.

Na Figura 5.20 está apresentada a folha "Parâmetros e avaliação temporal".

Parâmetros gerais	
Comprimento das barras	1600
Largura da barra	20
Altura da barra	90
Número de barras	54
Diâmetro do rotor	660
Comprimento do rotor	1500
Distância entre apoios do rotor e face do rotor	250
Perfis de ventilação (S/N)	N
Número de saltos de cravação	80
% de barras encravadas	0.33
Tempo de setup(min)	20
Tempo de colocação do rotor (min)	10
Tempo de colocação da paleta de barras na máquina (min)	5

Tempo total de trabalho	
11411.81	segundos
03:10:12	horas

Tempo sem a calibração e sem setup (M1)	
10190.41	segundos
02:49:50	horas

% de diversas operações no tempo total da máquina	
Calibração	0.19%
Manipulação de barras	8.10%
Inserção de barras	53.06%
Rotação do rotor	5.60%
Compressão das chapas	9.65%
Cravação das barras	4.84%
Outras operações	18.55%
Total	100.00%

Tempo de inserção de uma barra (sem encravar)	
75.39	segundos
00:01:15	horas

Tempo de inserção de uma barra (que encrava)	
185.63	segundos
00:03:06	horas

Figura 5.20 - Folha "Parâmetros e avaliação temporal"

5.4.2 *Grafcet Principal*

Nesta folha estão apresentadas todas as etapas do *Grafcet Principal* e os respectivos tempos para uma execução única das operações, isto é, os tempos das operações que são realizadas a todas as barras não estão multiplicados pelo número de barras ou de repetições. Esta folha serve de resumo para todos os tempos calculados nas folhas dos *macrografcets*.

A Figura 5.21 apresenta a tabela com os respectivos tempos para a avaliação temporal realizada.

Grafcet Principal		
Etapa	Tempo	Considerações
0	1200	
1	3	
2	600	
3	7	
M1	21.4	
4	300	
M2	9.4	
M3	1.64	
M4	15.47	
M5	112.13	
M6	5.92	
M7	20.4	
M8	10.23	
5	7	

Figura 5.21 - Folha "*Grafcet Principal*"

5.4.3 Folhas dos *Macrografcets*

Todas as folhas relativas a *macrografcets* apresentam a mesma estrutura, sendo esta composta por 3 tipos de tabelas: uma tabela para o cálculo do tempo de cada etapa, outra para as velocidades e cursos dos movimentos presentes no *macrografcet*, podendo os valores ser diferentes entre *grafcets*, e uma tabela com os seus parâmetros específicos.

As tabelas de parâmetros específicos são o que mais varia entre as diversas folhas, pois são parâmetros que foram considerados necessários englobar na avaliação temporal para a tornar o mais real possível. Muitos dos parâmetros não vão existir na realidade, sendo só necessários para a avaliação. Outros são indispensáveis, mas ao contrário dos parâmetros gerais, estarão definidos no autômato da máquina, não podendo ser alterados por operadores ou por quem não esteja qualificado para realizar a manutenção da máquina.

Existe também uma outra tabela, de pequena dimensão, que apresenta o tempo total de todo o *macrografcet*. Este é o valor de tempo que é transferido para a folha "*Grafcet Principal*".

Em seguida, serão analisados os procedimentos para calcular o tempo de cada *macrografcet* e as folhas desenvolvidas para o propósito, tendo especial foco nas tabelas de parâmetros específicos.

Folha M1

Na Figura 5.22 está apresentada a folha M1, onde é realizado o cálculo do tempo de ajuste dos sistemas auxiliares.

M1	
Etapas	Tempo
1.2	5
1.4	5
1.6	5
1.8	2
1.13	1.4
1.14	1.8
1.15	4
1.16	1.40
1.17	1.80
1.18	3.00
1.19	
1.20	3
Tempo total	21.4

Velocidades e Cursos				
Movimento	Vel. avanço	Vel. recuo	Curso	Tempo
A31	50	50	150	
A40	50	50	70	
A51	50	50	70	
B10	50	50	250	
B11	50	50	250	
B12	50	50	250	
B13	50	50	100	
B50	50	50	15	
B51[angular]	5			4
B60[angular]	30			1
B61	40	40	20	
B70	0	0	0	

Parâmetros específicos de M1	
Nome	Valor
% de ranhuras a analisar no ajuste	0.33

Figura 5.22 - Folha "M1"

Na tabela das velocidades, para o movimento B70, nota-se que a velocidade de avanço e recuo está estipulada para 0. Isto é devido à análise estar a ser realizada a um rotor de diâmetro máximo, que nesse caso, não exige que o movimento B70 se realize.

Para realizar o ajuste dos sistemas de rotação e posicionamento é necessário identificar o "padrão" das ranhuras, anteriormente mencionado. Foi então definido um parâmetro "percentagem de ranhuras a analisar no ajuste" que, define quanto é que o rotor tem que rodar até ser considerado que se reconhece o "padrão". Este valor estará incluído na programação do autômato e, preferencialmente, será encontrado o seu valor otimizado experimentalmente. Na avaliação realizada foi decidido que o rotor tem de rodar o equivalente a um terço das suas ranhuras.

Folha M2

Na Figura 5.23 está apresentada a folha M2, onde é realizado o cálculo do tempo da rotação do rotor durante a inserção.

Como exemplificado no *macrografcet* M2 e discutido anteriormente, a rotação do rotor durante a inserção não pode ser ranhura a ranhura, pois inserir barras em ranhuras adjacentes causaria desequilíbrios rotacionais no rotor, dificultando o seu bloqueio. É então necessário o rotor rodar um certo valor angular fixo. Esse valor foi definido como 90 °, sendo representado pelo parâmetro "Critério angular de rotação". Este valor será programado no autômato, podendo ser alterado caso

M2	
Etapas	Tempo
2.1	1.8
2.2	1.4
2.5	3
2.7	1.4
2.8	1.8
Tempo total	9.4

Velocidades e Cursos				
Movimento	Vel. avanço	Vel. recuo	Curso	Tempo
A40	50	50	70	
A51	50	50	70	
B50	50	50	15	
B51[angular]	5			3
B60[angular]	30			1
B61	40	40	20	

Parâmetros específicos de M2	
Nome	Valor
Critério angular de rotação (graus)	90

Figura 5.23 - Folha "M2"

se decida que não é o mais otimizado.

Com o valor de 90 ° como critério de rotação, a cada 4 rotações o rotor tem de rodar uma ranhura extra para poder continuar a inserir as barras. Essa rotação não esta contabilizada no tempo desta operação devido ao seu diminuído valor, como se pode verificar na folha do *macrografcet* M6, onde a rotação é sempre realizada ranhura a ranhura, tendo sido portanto considerada negligenciável nesta operação.

Folha M3

A Figura 5.24 demonstra a folha M3, com os cálculos das etapas do *macrografcet* da manipulação de barras no depósito.

M3	
Etapas	Tempo
3.2	0.5
3.3	0.43
3.4	0.14
3.5	1.1
Tempo total	1.64

Velocidades e Cursos				
Movimento	Vel. avanço	Vel. recuo	Curso	Tempo
C11	10	10	5	
C12	70	70	10	
C13			12	
C14[angular]	14		90 graus	1.07

Parâmetros específicos de M3	
Nome	Valor
Coef. De segu. P/ calc. de condições (M3)	3
Condição temporal da etapa 3.3	0.43

Figura 5.24 - Folha "M3"

Neste caso existe uma transição temporal, como mencionado no subcapítulo 5.2. Para calcular todas as condições temporais existentes nos diversos *macrografcets* foi definido que existe um coeficiente de segurança para o cálculo de condições temporais, isto é, um coeficiente que quando multiplicado pelo tempo esperado para o movimento ser realizado, dá o valor da condição temporal.

Este coeficiente não é necessariamente de valor igual para todas condições. É um valor previamente estipulado e inserido para cada *grafcet*.

Como em todos os outros casos, o tempo esperado da etapa, que depois será multiplicado pelo coeficiente de segurança para o cálculo de condições temporais, é estimado através da velocidade e do curso definidos para o movimento da etapa em questão.

Folha M4

Na Figura 5.25 pode-se observar a folha de *Excel* do *macrografcet* de manipulação de barras na mesa de elevação.

M4	
Etapa	Tempo
4.3	
4.5	3
4.6-B11	1.73
4.6-B13	0.40
4.7	6
4.8	3
4.90	1.73

Velocidades e Cursos				
Movimento	Vel. avanço	Vel. recuo	Curso	Tempo
B11	150	150	260	
B13	150	150		
C11				
C13				
C20	100	100	300	

Tempo	
total	15.47

Parâmetros específicos de M4	
Nome	Valor
Coef. De segu. P/ calc. de condições (M4)	3
Distância entre a ponta das barras e a guia do grampo da esquerda	300
Condição temporal da etapa 4.7	6

Figura 5.25 - Folha "M4"

A etapa 4.3 aparece com o valor de tempo esperado de 0 pois esta realiza-se em paralelo com todas as outras etapas deste *grafcet*, não contando por isso, para o valor total.

Neste *grafcet*, existem também condições temporais e, conseqüentemente, existe o coeficiente de segurança para o cálculo de condições temporais. Adicionalmente, existe um parâmetro que representa uma realidade física fixa. Este é a distância da ponta da barra até ao grampo da esquerda. Como já referido, esta distância é sempre fixa pois as barras são colocadas no depósito encostadas a um dos seus lados. Este parâmetro deve ser considerado e programado no autômato, depois de devidamente confirmado. O valor presente na imagem é simplesmente uma estimativa retirada da análise do modelo 3D realizado.

Folha M5

Na Figura 5.26 é apresentada a folha de *Excel* relativa ao *grafcet* de inserção de barras.

Nesta *grafcet* são necessários diversos parâmetros específicos, como se pode observar na Figura 5.26.

Primeiro existem diversas condições temporais e, portanto, um coeficiente de segurança associado. Apesar desse coeficiente, as condições temporais neste caso apresentam mais pormenores. Relativamente às condições de avanço do grampas, condições das etapas 5.2 e 5.3 e das etapas 7.2,

M5		
Etapa		Tempo
5.1		3
5.2		3.6
5.3		4.6
5.4		5.47
5.5		0.6
5.6		0.4
5.7		2
5.8		0.33
5.9		0.2
5.9*- encravadas(adimensional)		46.80
5.9*-não encravadas (adimensional)		15.60
5.10		0.6
5.11		3
Tempo total		112.13

Velocidades e Cursos				
Movimento	Vel. avanço	Vel. recuo	Curso	Tempo
A31	50	50	150	
B20	50	100	60	
B30	50	100	60	
B31	50	100	60	
B32	50	100	20	
B80	150	150	1600	

Parâmetros específicos de M5	
Nome	Valor
Coef. De segu. P/ calc. de condições (M5)	3
Condição temporal da etapa 5.2	3.6
Condição temporal da etapa 5.3	4.6
Condição temporal da etapa 5.7(inserção forçada)	2
Coef. De segu. P/ calc. do nº de inserções	3
% do comprimento da barra que encrava	0.33
Curso obrigatório de inserção forçada	780

Figura 5.26 - Folha "M5"

7.3 e 7.4 na compressão das chapas do rotor, existe mais um fator que intervém no seu cálculo. Estas etapas são as consecutivas compressões das chapas do rotor a diferentes pressões, com intuítos e objetivos diferentes. Assim, foi definido que só a condição temporal do aperto a baixa pressão é que é calculada de maneira idêntica a outras condições temporais. As condições para os apertos a média e alta pressão são maiores por um e dois segundos, respetivamente. Deste modo, garante-se uma maior compressão das chapas do rotor em cada movimento de maior pressão, especialmente no movimento da etapa 7.3 (compressão das chapas do rotor).

A condição temporal da etapa 5.7 é a condição temporal que define o tempo que se vai forçar a barra na inserção forçada. Esta foi estipulada como dois segundos para esta avaliação, não sendo já definitivo o seu valor. Independentemente, é um valor imprescindível que vai ser englobado e afinado no autómato.

Durante a inserção incremental da barras, quer esta seja realizada com a barra encravada ou não, o curso máximo que a barra pode ser inserida de cada movimento incremental é de 50 mm, e a inserção forçada é realizada até a barra ser detetada no lado oposto à inserção. No caso das barras que encravam, esse 50 mm de inserção nem sempre são cumpridos. Portanto, para avaliar o desempenho temporal da máquina com alguma realidade, é necessário ter este fator em conta. Assim, foi definido um coeficiente de segurança para o cálculo do número de inserções. Este parâmetro é totalmente fictício, só sendo necessário na avaliação, e permite estimar o número de inserções no caso de uma barra que encravou. Naturalmente, nem todas as barras encravam, e nos casos em que a barra não encrava e atinge a fase de inserção incremental, o numero de inserções é calculado pelo curso que falta inserir a dividir pelos 50 mm. A percentagem de barras que encravam é introduzida na avaliação na folha "Parâmetros e avaliação temporal" e pelo *feedback* da empresa ronda os 33,33%.

Evidentemente, esta análise contém ainda um outro problema, a determinação da zona onde a barra vai encavar. Através do *macrografcet* M5 observa-se que uma barra é inserida incrementalmente devido a duas condições: quando encrava ou quando o movimento de inserção rápida

Proposta de comando

atingiu o fim do seu curso.

Assim sendo, é necessário introduzir na avaliação a distância mínima obrigatória que a barra tem de ser inserida incrementalmente, que corresponde à distância a que a barra fica quando o esbarro móvel atingiu o fim de curso. O valor deste parâmetro foi retirado da análise do modelo 3D.

Para os casos em que a barra encrava, foi definido outro parâmetro que não será transposto para a realidade de controlo da máquina: a percentagem do comprimento da barra em que ocorre um encravamento. Os encravamentos ocorrem maioritariamente quando a barra já está a mais de metade do seu comprimento dentro do rotor, e portanto, com este valor, determina-se uma distância média em que a barra encrava, caso seja uma das barras que encrava.

Não sendo o método mais próximo da realidade possível, a adição deste parâmetro à avaliação temporal aumenta na mesma o seu realismo, tornado-a suficientemente real para poder ser analisada com alguma segurança.

Folha M6

A folha de M6, relativa à rotação do rotor na compressão e cravação de barras, é apresentada na Figura 5.27.

M6	
Etapas	Tempo
6.1	1.8
6.2	0.7
6.3	0.22
6.4	1.4
6.5	1.8
Tempo total	
5.92	

Velocidades e Cursos				
Movimento	Vel. avanço	Vel. recuo	Curso	Tempo
A40	50	100	70	
A51	50	100	70	
B50	50	50	15	
B51[angular]	5			0.22
B60[angular]	30			1
B61	40	40	20	

Figura 5.27 - Folha "M6"

Na "planificação" deste *grafcet* não se verificou necessário a adição de parâmetros específicos. A rotação nesta operação é sempre ranhura a ranhura, de modo a ser o mais eficiente possível na compressão de todas as chapas de rotor e na cravação de todas as barras. Assim, a folha só apresenta duas tabelas: a tabela para o cálculo do tempo da etapa e a tabela para as velocidades e cursos dos movimentos presentes no *macrografcet*.

Folha M7

Na Figura 5.28 pode-se observar a folha relativa ao *macrografcet* M7, que corresponde à operação de compressão das chapas do rotor.

M7	
Etapa	Tempo
7.1	3
7.2	3.6
7.3	4.6
7.4	5.6
7.5	0.6
7.6	3

Tempo	
total	20.4

Velocidades e Cursos				
Movimento	Vel. avanço	Vel. recuo	Curso	Tempo
A31	50	50	150	
B20	50	100	60	
B30	50	100	60	

Parâmetros específicos de M7	
Nome	Valor
Coef. De segu. P/ calc. de condições (M7)	3
Condição temporal da etapa 7.2	3.6
Condição temporal da etapa 7.3	4.6
Condição temporal da etapa 7.4	5.6

Figura 5.28 - Folha "M7"

Os parâmetros específicos deste *grafcet* são as condições temporais de avanço dos grampos, idênticas às condições correspondentes na folha M5. Como anteriormente referido, estas condições apresentam mais um segundo por cada nível de pressão superior ao nível baixo, sendo que nesta folha existe a condição para o avanço dos grampos a elevada pressão, que corresponde à compressão das chapas do rotor.

Folha M8

A folha M8, que representa o último *macrografcet*, é apresentada na Figura 5.29. Esta é relativa à operação da cravação radial das barras.

M8-Rotor convencional	
Etapa	Tempo
8.1	0.3
8.4 / 8.5	9.33
8.11	0.6

Tempo total	
	10.23

M8-Rotor com perfis de ventilação	
Etapa	Tempo
8.1	0.3
8.7-8.8 / 8.9-8.10: zonas sem cravação	4
8.7-8.8 / 8.9-8.10: zonas com cravação	8
8.11	0.6

Tempo total	
	25.8

Velocidades e Cursos				
Movimento	Vel. avanço	Vel. recuo	Curso	Tempo
812	150	150	1400	
840	50	100	30	
841				

Parâmetros específicos de M8	
Nome	Valor
Curso/tamanho de uma zona de não cravação	10
Coeficiente de "segurança" p/ as acelerações e desacelerações nos saltos de cravação	2

Figura 5.29 - Folha "M8"

Neste *grafcet* existem duas possibilidades, como previamente referido: a cravação sem saltos de cravação e a cravação com saltos de cravação. Deste modo, foram desenvolvidas duas tabelas independentes para um dos casos, pois ambos iriam apresentar etapas e tempos diferentes.

Se um rotor apresenta perfis de ventilação e necessita de realizar a cravação com os respectivos saltos de cravação, esta informação é um dado que deve ser introduzido na HMI pelo operador, sendo assim um parâmetro geral na avaliação temporal. Da mesma forma, o número de saltos de cravação de um rotor é também um parâmetro geral.

Foram definidos dois parâmetros específicos para esta folha: tamanho de uma zona de não cravação e um coeficiente de segurança para as acelerações e desacelerações nos saltos de cravação.

O primeiro é um parâmetro real, que estará incluído no autômato. Este é relativo ao curso em que o cilindro B41, cilindro de cravação, está recuado, não cravando a barra. Os saltos de cravação são geralmente de pequena dimensão, mas para evitar problemas de cravação, define-se um curso relativamente maior, em que não ocorrerá cravação. Esse curso é então definido pelo parâmetro "tamanho de uma zona de não cravação".

Outra particularidade definida para as zonas de cravação é uma menor velocidade da carruagem de cravação. Isso implica desacelerações e acelerações nas entradas e saídas das zonas de não cravação. Para contar com esses tempos na avaliação temporal, foi introduzido o parâmetro "coeficiente de segurança para as acelerações e desacelerações nos saltos de cravação", que na máquina real não terá aplicabilidade.

Assim, o tempo de cravação num rotor com perfis de ventilação é calculando dividindo as etapas 8.7 a 8.8 (semelhantes e contidas num "OU" lógico com as etapas 8.9 a 8.10) em duas partes: uma para calcular o tempo de cravação em zonas normais e outra para calcular o tempo que a carruagem demora a ultrapassar as zonas de não cravação.

5.4.4 Análise da avaliação temporal

Finalizado o documento da avaliação temporal é necessário analisar e interpretar os dados obtidos, de modo a conseguir avaliar o desempenho da máquina, verificar que se encontra dentro dos critérios estabelecidos e identificar as operações que podem ser melhoradas.

A avaliação foi realizada a 4 conjuntos de rotores/barras, obtendo assim um maior número de dados para analisar, que se traduz, efetivamente, numa melhor apreciação global.

As avaliações realizadas são seguidamente identificadas:

- Avaliação 1 : Rotor com diâmetro de 660 *mm* e 1500 *mm* de comprimento, 54 barras com dimensões 90x20x160 e sem perfis de ventilação;
- Avaliação 2 : Rotor com diâmetro de 660 *mm* e 1500 *mm* de comprimento, 54 barras com dimensões 90x20x160 e com 80 perfis de ventilação;
- Avaliação 3 : Rotor com diâmetro de 660 *mm* e 1500 *mm* de comprimento, 112 barras com dimensões 50x10x1600 e sem perfis de ventilação;
- Avaliação 4 : Rotor com diâmetro de 380 *mm* e 500 *mm* de comprimento, 60 barras com dimensões 30x8x600 e sem perfis de ventilação.

Os resultados obtidos destas 4 avaliações estão apresentados na Figura 5.30.

		Avaliação 1		Avaliação 2		Avaliação 3		Avaliação 4	
Rotor		φ660, 54 barras, 90x20x1600		φ660, 54 barras, 90x20x1600 c/perfis de ventilação		φ660, 112 barras, 50x10x1600		φ380, 60 barras, 30x8x600	
Tempo total de trabalho		03:10:12 horas		03:24:12 horas		06:00:02 horas		03:18:37 horas	
Tempo sem a calibração e sem setup (M1)		02:49:50 horas		03:03:51 horas		05:39:40 horas		02:58:15 horas	
Tempo de inserção de uma barra (sem encravar)		75.39 segundos		75.39 segundos		75.39 segundos		69.92 segundos	
Tempo de inserção de uma barra (que encrava)		185.63 segundos		185.63 segundos		185.63 segundos		180.16 segundos	
% de diversas operações no tempo total da máquina									
Calibração		0.19%		0.17%		0.10%		0.18%	
Manipulação de barras		8.10%		7.54%		10.06%		10.34%	
Inserção de barras		53.06%		49.42%		58.14%		53.71%	
Rotação do rotor		5.60%		5.22%		6.02%		5.94%	
Compressão das chapas		9.65%		8.99%		10.58%		10.27%	
Cravação das barras		4.84%		11.37%		5.31%		1.80%	
Outras operações		18.55%		17.28%		9.80%		17.76%	

Figura 5.30 - Folha de comparação de resultados obtidos na avaliação temporal

Começando pela análise do "Tempo total de trabalho" podemos reparar que a avaliação 1, apesar de ser a realizada ao maior rotor com as maiores barras, é a que apresenta o menor tempo. De facto, todos os tempos são da mesma ordem de grandeza, cerca 3 horas, menos para o rotor com 112 barras. Em todos os casos, a percentagem de tempo consumido na operação de inserção é cerca de metade do tempo total de trabalho. Estes dois pontos levam-nos a concluir que esta operação é de longe a que mais influencia o desempenho da máquina. É então a operação que mais beneficia de melhorias, pois se for possível diminuir este tempo, poderá obter-se elevados desempenhos da máquina.

Ao analisar o tempo de inserção de uma barra, nos casos que encrava e nos que não encrava, repara-se que este é pouco variável e que é superior ao tempo médio de inserção dos dados fornecidos pela *WEG S.A.*, retirados da tabela 2.1, que é de 30,46 s. Este aumento é indesejado, e apesar do tempo total de trabalho ser bastante satisfatório comparando-o com a realidade atual do processo, que exige também o dobro da mão de obra, esta operação tem de ser analisada e melhorada.

A primeira causa possível para este elevado tempo de inserção de uma barra é o elevado curso obrigatório de inserção forçada. Diminuindo este valor é possível inserir uma maior parte da barra em modo de inserção rápida, que diminui consideravelmente o tempo de inserção, pois não são necessários os diversos avanços incrementais. Assim, este ponto é o ponto fulcral a melhorar na máquina, para obter o melhor desempenho possível.

Apesar deste elevado tempo de inserção, o facto de este ser relativamente constante é um benefício, pois mais facilmente se pode estimar o tempo de produção, ao contrário do caso atual, onde o tempo do processo é muito volátil, tornando mais difícil de organizar as diversas ordens de fabrico.

Analisando as restantes operações do processo, nota-se que as que apresentam a maior influência no tempo total, à excepção da inserção, são a categoria "Outras operações" e "Manipulação de barras". A primeira é relativa a todas as operações presentes no *grafcet* principal, mas que não sejam consideradas *macrografcets*, como por exemplo, o *setup* da máquina e a movimentação do rotor. Este tempo pode ser facilmente diminuído programando as ordens de produção de rotores e barras semelhantes para serem seguidas, evitando a necessidade de realizar o *setup* completo da máquina em cada execução da máquina. No caso da "Manipulação de barras" apesar de esta operação ser, em geral, a 3ª operação mais consumidora de tempo, a sua percentagem ronda os 10% ,que não é alarmante no panorama geral da máquina.

Resumindo, da avaliação temporal realizada, pode-se concluir que o desempenho da máquina não está muito distante do proposto inicialmente, e ainda que ligeiramente superior, a máquina traz outras vantagens, como a diminuição da mão de obra para metade, a possibilidade de trabalhar em contínuo, e a isenção de trabalho físico custoso por parte de operadores. Ao mesmo tempo, a análise da avaliação temporal permitiu identificar as operações críticas e os pontos a melhorar do

protótipo desenvolvido, que se traduzirão num ainda menor tempo total de trabalho.

5.5 Conclusão

Neste Capítulo, foi apresentada e caracterizada toda a proposta de comando da máquina, analisando movimento a movimento, completando assim toda a descrição da solução construtiva apresentada no Capítulo 4 e finalizando a fase 4 deste estudo. Foram apresentados os circuitos de comando pneumáticos e hidráulicos, sendo minuciosamente descritos e explicados. Para complementar esta fase e toda a lógica inerente ao funcionamento da máquina, foram desenvolvidos os *grafcets* comportamentais da máquina de maneira expedita, mas com rigor suficiente para serem uma ferramenta de análise e de trabalho futuro credíveis.

Adicionalmente, tendo estabelecido todas as particularidades do funcionamento normal da máquina, foi realizada uma avaliação do desempenho temporal da máquina com base nos *grafcets* desenvolvidos e nas características cinemáticas e dinâmicas dos movimentos apresentados no Capítulo 4. Esta análise simula o funcionamento da máquina e permite avaliar pontos a melhorar no seu funcionamento. Ao mesmo tempo, possibilita a apresentação de dados sobre a sua *performance*, que, ainda que simulados, ajudam na decisão de construção da máquina e demonstram a sua importância em termos de melhorias no processo de produção atual.

Concluindo, no Capítulo 5 foram expostas e descritas todas as componentes desenvolvidas relativas à automação da máquina, servindo como etapa final do estudo realizado, complementando e, por vezes justificando, todas as decisões tomadas nos Capítulos 3 e 4.

Proposta de comando

Capítulo 6

Conclusões e trabalhos futuros

6.1 Conclusões

Esta dissertação tinha como principal objetivo a realização de um estudo inicial, embora completo, real e credível, que servisse de base para a decisão de construção de um primeiro protótipo de uma máquina de inserção de barras em rotores de motores elétricos. Era, portanto, a realização de um anteprojeto da máquina, com especial foco na obtenção de uma solução de princípio plausível. Concluída a dissertação, pôde-se avaliar todo o seu desenvolvimento, analisando criticamente os resultados obtidos e comparando-os com as metas inicialmente definidas. Podem então ser destacados os benefícios que a automatização do processo apresenta para a produção deste tipo de rotores:

- Com a implementação da máquina é possível tornar um processo que era uma etapa crítica na linha de produção, num processo eficiente e expedito.
- A mão de obra necessária para o processo muda de 2 operadores para 1, tendo este apenas uma função de supervisão. Isto permite que este mesmo operador realize outras tarefas adicionais, não sendo necessário a tempo inteiro na máquina.
- O esforço humano requerido diminui drasticamente. O manuseamento das barras na inserção, a utilização do martelo pneumático para as forçar, a rotação do rotor, a compressão das chapas e a cravação das barras, tudo realizado por pancadas com um martelo, são operações totalmente substituídas por elementos ativos, tornando o processo mais seguro e menos desgastante. No caso da operação de alinhamento de barras, obtém-se um posicionamento mais rigoroso do que o realizado atualmente. A alteração de todas estas operações torna o processo muito menos moroso e repetitivo, o que também é interpretado como uma melhoria para as condições de trabalho dos operadores.

- O rigor obtido com a utilização de sistemas automáticos permite uma melhor qualidade e confiabilidade na produção, que se traduz numa melhoria da qualidade geral dos rotores.
- A possibilidade da máquina trabalhar constantemente é uma vantagem face ao processo atual, que é limitado pelos turnos dos operadores e pelo cansaço físico destes mesmos.
- Apesar de não comparados com dados reais do tempo total na produção destes rotores, os valores obtidos na avaliação temporal são satisfatórios. A inserção de barras, em alguns casos, pode ser mais demorada, mas, comparando com o tempo consumido para realizar as operações adicionais de compressão, alinhamento e cravação, crê-se que a máquina diminui os tempos totais.

Relativo ao desenvolvimento do trabalho são também destacados alguns pontos:

- Foi possível desenvolver um anteprojeto da máquina que, não só é capaz de realizar a tarefa de inserção de barras, como todas as operações complementares desta etapa do processo de produção de rotores, tornando toda esta fase automática e demonstrando assim a viabilidade da sua automatização.
- No Capítulo 3, apesar de se sentir que esta foi realizada com sucesso, os conceitos inicialmente abordados neste Capítulo poderiam ter sido ainda mais trabalhados, evitando alguns problemas que se manifestaram no desenvolvimento da solução construtiva.
- No Capítulo 4, é necessário realçar o número de iterações realizadas para obter a solução construtiva, partindo da solução conceptual. No entanto, a solução final apresentada é convincente, cumprindo os requisitos pedidos pela empresa.
- A proposta de comando apresentada é como uma solução conceptual do projeto de automação, isto é, é a base a partir da qual se vai programar a máquina de modo a comandar e controlar os seus movimentos. Esta não é definitiva, pois está sempre dependente dos componentes, ferramentas e atuadores reais da máquina. No entanto, a realização desta fase é de extrema importância, pois valida todo o trabalho realizado para a solução construtiva, mostrando, mais uma vez, que a automação do processo é viável.

Concluindo, o projeto de dissertação finaliza com uma solução credível e suficientemente detalhada para a automatização do processo proposto, mostrando as suas vantagens e melhorias face ao processo atual e, justificando assim a sua necessidade. Com este trabalho, é possível avançar de uma fase de anteprojeto para uma fase de projeto de construção, eventualmente seguida da própria construção da máquina.

6.2 Trabalhos futuros

O tema da dissertação está inserido num projeto de maior dimensão: a construção de uma solução automatizada para o processo de inserção de barras em rotores de motores elétricos especiais. Assim, os trabalhos futuros são numerosos. Neste subcapítulo só vão ser evidenciados os que se consideram relevantes para a fase de projeto da máquina, e não todos os necessários para a construção da máquina.

Relativamente à solução construtiva, a melhoria de algumas soluções, à luz da proposta de comando e da análise de movimento realizada, é inevitável. Estas são as seguintes:

- Diminuição do curso mínimo obrigatório de inserção incremental;
- Análise estrutural de alguns elementos, como, por exemplo, a ferramenta de manipulação, os grampos e a própria estrutura;
- Verificação mais detalhada de alguns mecanismos, como por exemplo, a aproximação da roda de fricção;
- Realização dos desenhos de conjunto da máquina e das ferramentas especiais.

No caso da automatização da máquina, existem também várias melhorias a realizar, seguidamente identificadas:

- Projeto e desenho dos esquemas elétricos da máquina;
- Procedimentos e esquemas de segurança da máquina;
- Projeto do *software* da máquina com integração num ambiente de indústria 4.0.

Finalmente, realizados todos estes trabalhos, a avaliação económica de toda a máquina e dos seus componentes, com propósito de elaboração de um orçamento preliminar, é de extrema importância, permitindo assim um estudo mais completo da máquina, do seu impacto na automatização do processo e do impacto económico para a empresa, tornando possível avaliar a sua viabilidade.

Referências

- [1] WEG S.A., 2019. Disponível em https://www.weg.net/institutional/BR/pt/weg-operations?fbclid=IwAR3uJ6bWa0dQGvnRJz3AJcupZ03EHW_1OIiZAFgLVXVDGeeBhI7AGqhb4d4.
- [2] Revista Manutenção. WEG abre a segunda fábrica em Portugal, 2018. Disponível em <https://www.revistamanutencao.pt/2018/05/weg-abre-a-segunda-fabrica-em-portugal/>.
- [3] WEG S.A.. WEG Corporate Presentation. 2018.
- [4] WEG S.A.. Acionando o Maior Triturador Industrial do Mundo, 2009. Disponível em <https://www.weg.net/institutional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/acionando-o-maior-triturador-industrial-do-mundo>.
- [5] Paulo Abreu e Manuel Romano Barbosa. Sistemas eletromecânicos. pages 7–16, 2018.
- [6] LTD HLQ INDUCTION EQUIPMENT CO. Dulani stator yoyenera ndi rotor ndi induction, 2018. Disponível em <https://dw-inductionheater.com/ny/Sewerani-stator-yoyenera-ndi-rotor-ndi-kulowetsa.html>.
- [7] Electropaedia. Electric drives - ac motors (description and applications), 2018. Disponível em <https://www.mpoweruk.com/motorsac.htm>.
- [8] Spud's Blog. Synchronous generators - an overview of construction and operation, 2018. Disponível em <https://idahospudsblog.blogspot.com/2018/04/synchronous-generators-overview-of.html>.
- [9] Hydraulics & Pneumatics. Hydraulic-electric analogies: Power sources, part 3, 2019. Disponível em <https://www.hydraulicspneumatics.com/hydraulic-pumps-motors/hydraulic-electric-analogies-power-sources-part-3>.
- [10] Delotek. High voltage induction motors, 2018. Disponível em <http://www.doulipower.com/blog/Company-News/High-voltage-induction-motors/detail/352/>.
- [11] Diário da República, 2ª série - N.º119. junho 2007.
- [12] WEG S.A.. Automation - Servo Drive SCA06. Technical report, 2014.
- [13] Bosch Rexroth. Ball Rail Systems with Gear Rack. Technical report, 2019.

REFERÊNCIAS

- [14] S.C.Skinner. *Elementos de hidráulica proporcional*. Europa Vickers Systems Division, 1994.
- [15] *Micro-Epsilon*. Draw-wire displacement sensors. Technical report.

Anexo A

Circuitos de comando



136



137

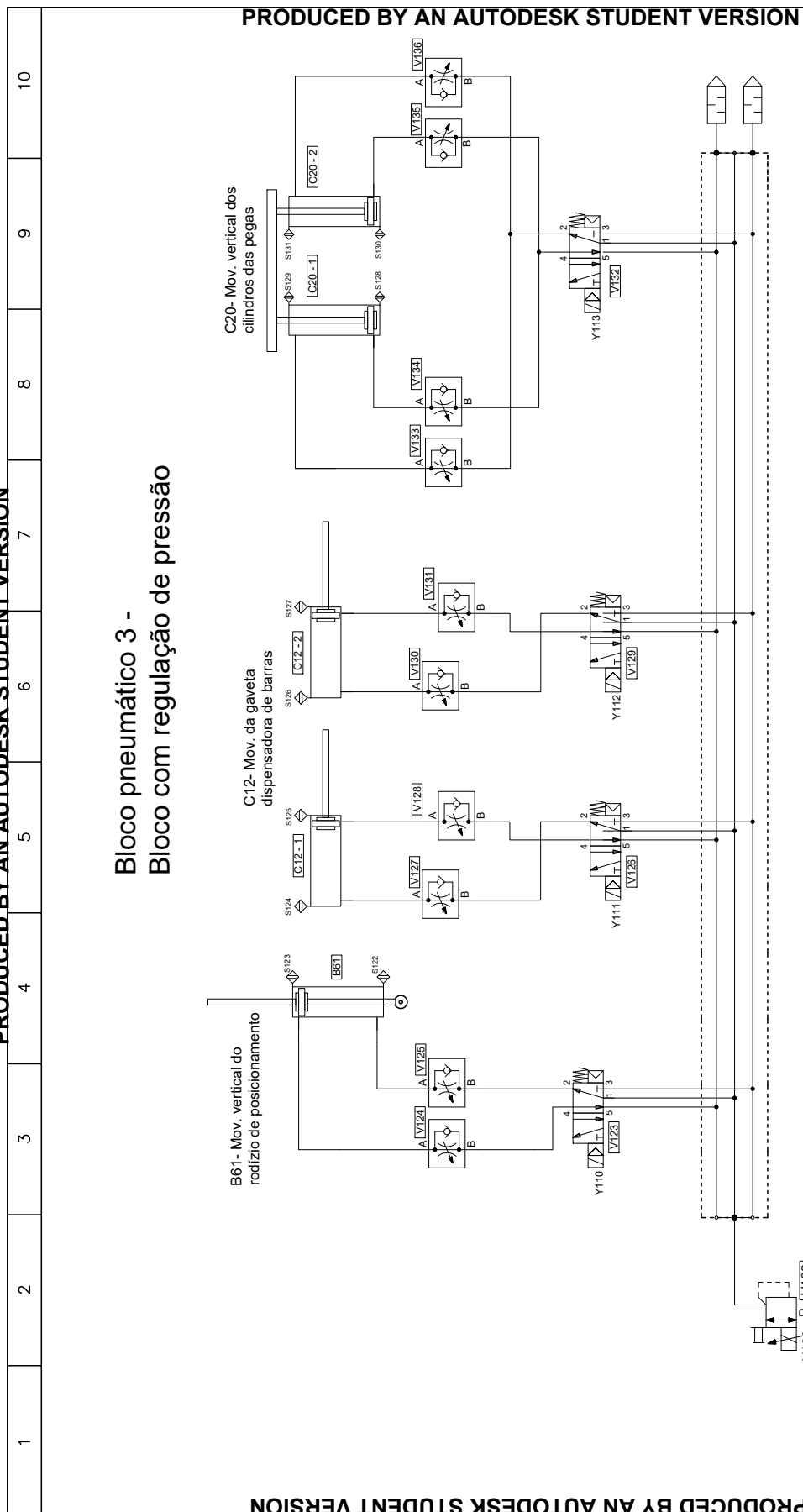


Figura A.3 - Esquema pneumático - Bloco 3



Anexo B

Grafçets

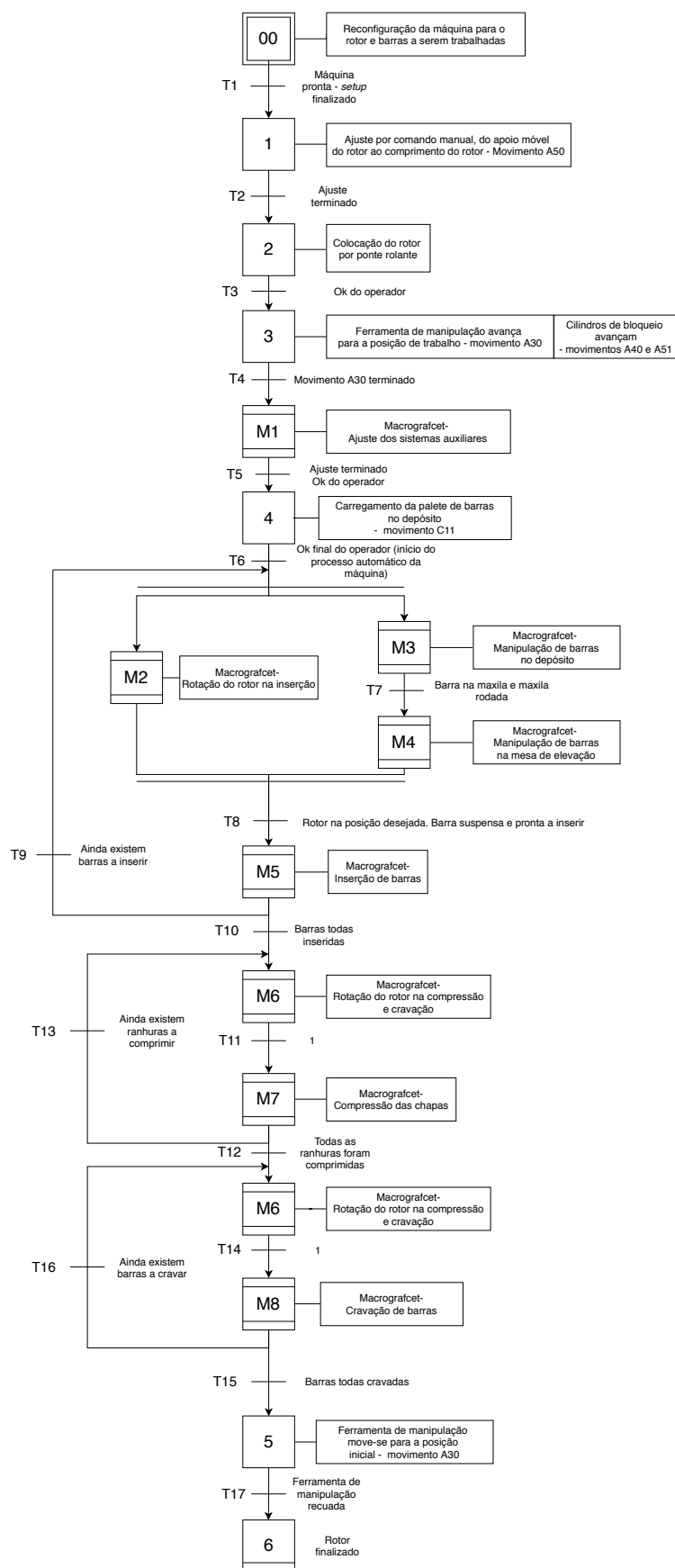


Figura B.1 - *Grafjet* Principal

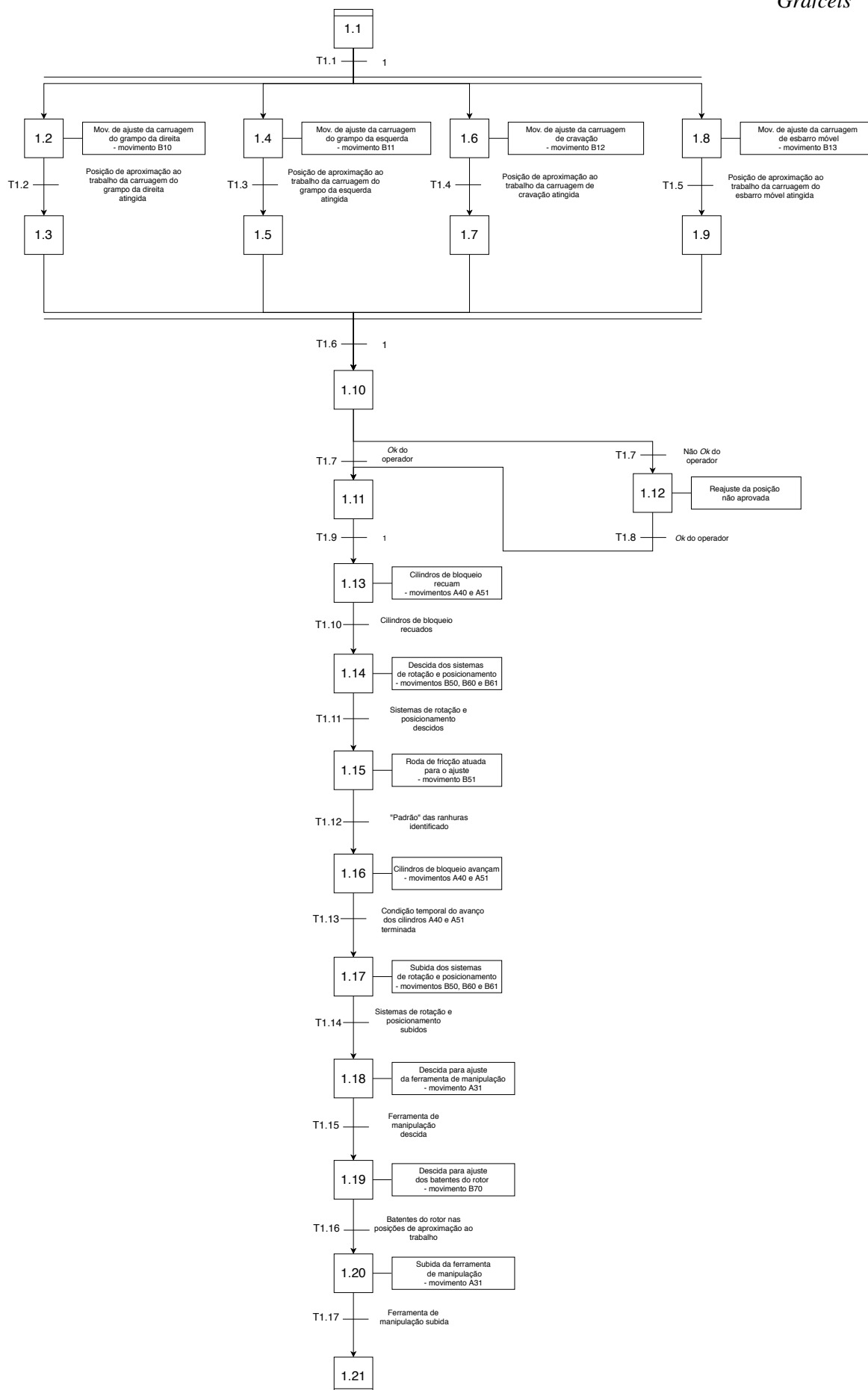


Figura B.2 - Grafcat M1
143

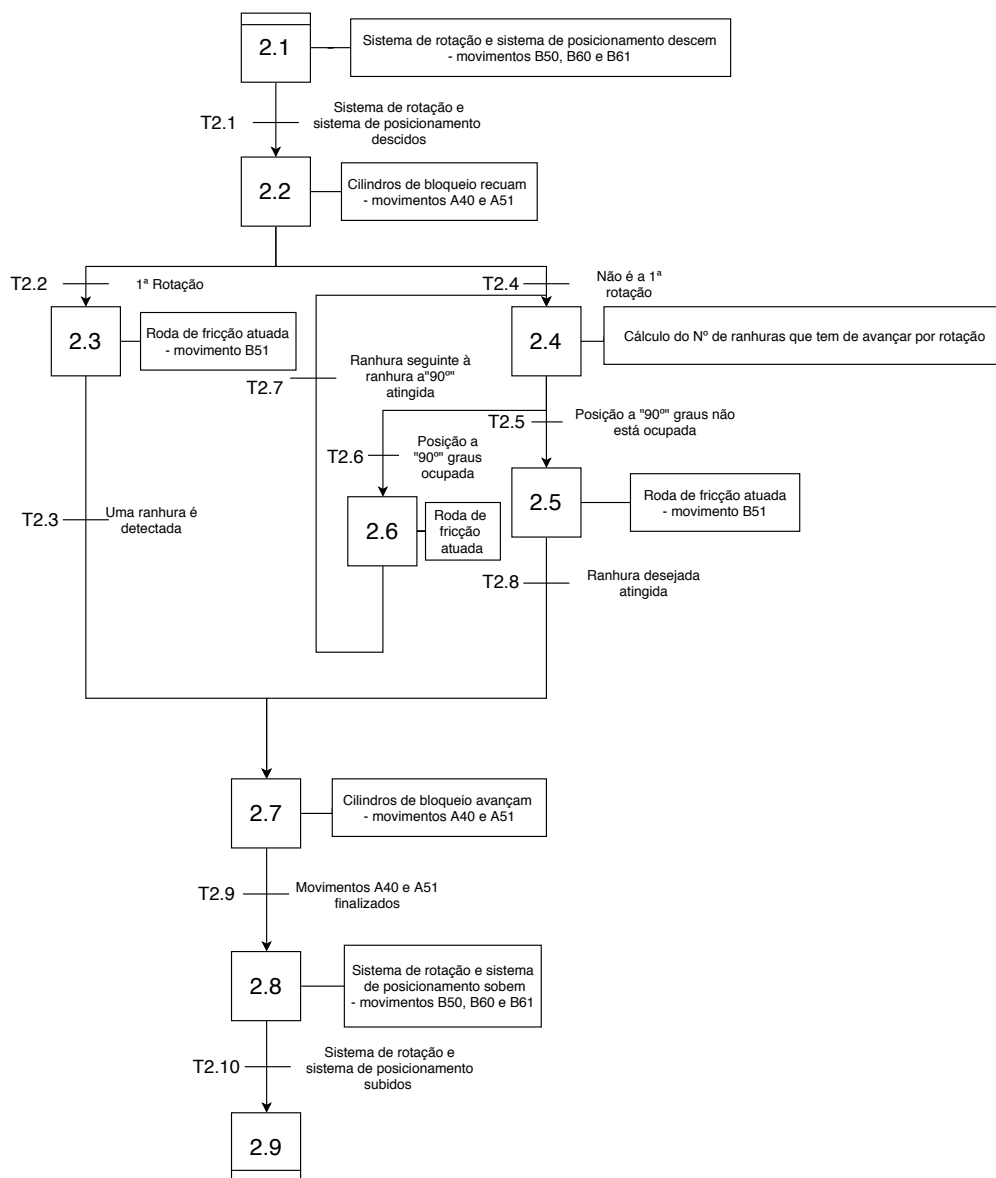


Figura B.3 - *Graficet* M2

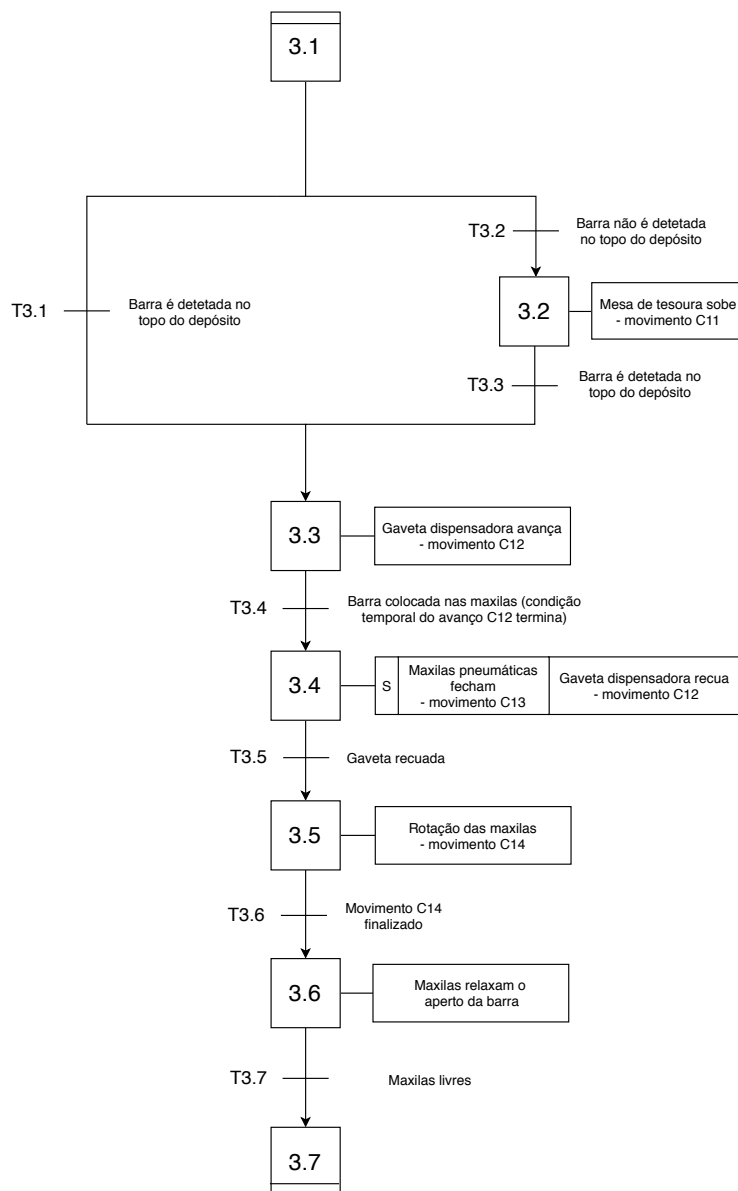


Figura B.4 - Grafcet M3

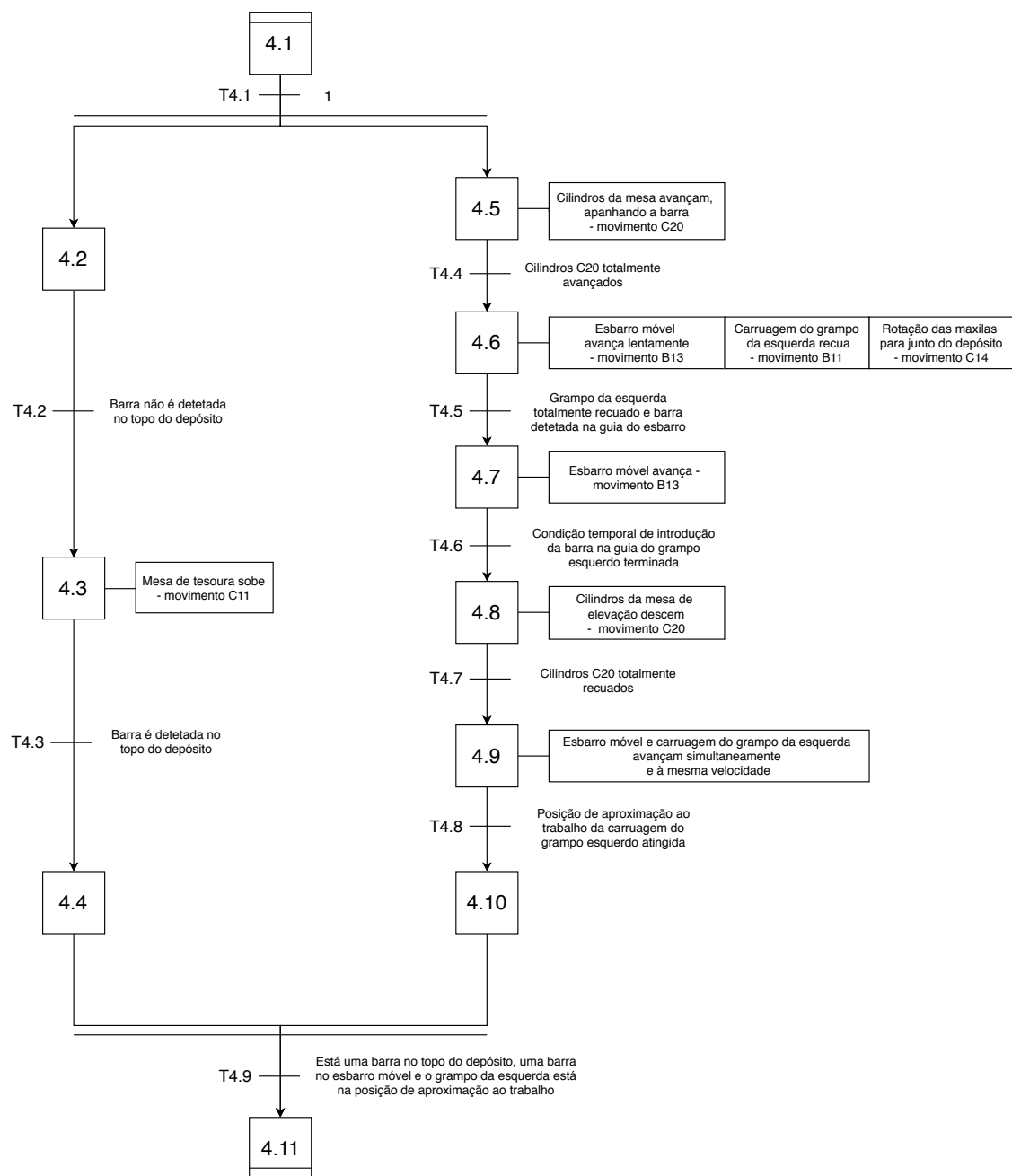


Figura B.5 - *Graficet M4*

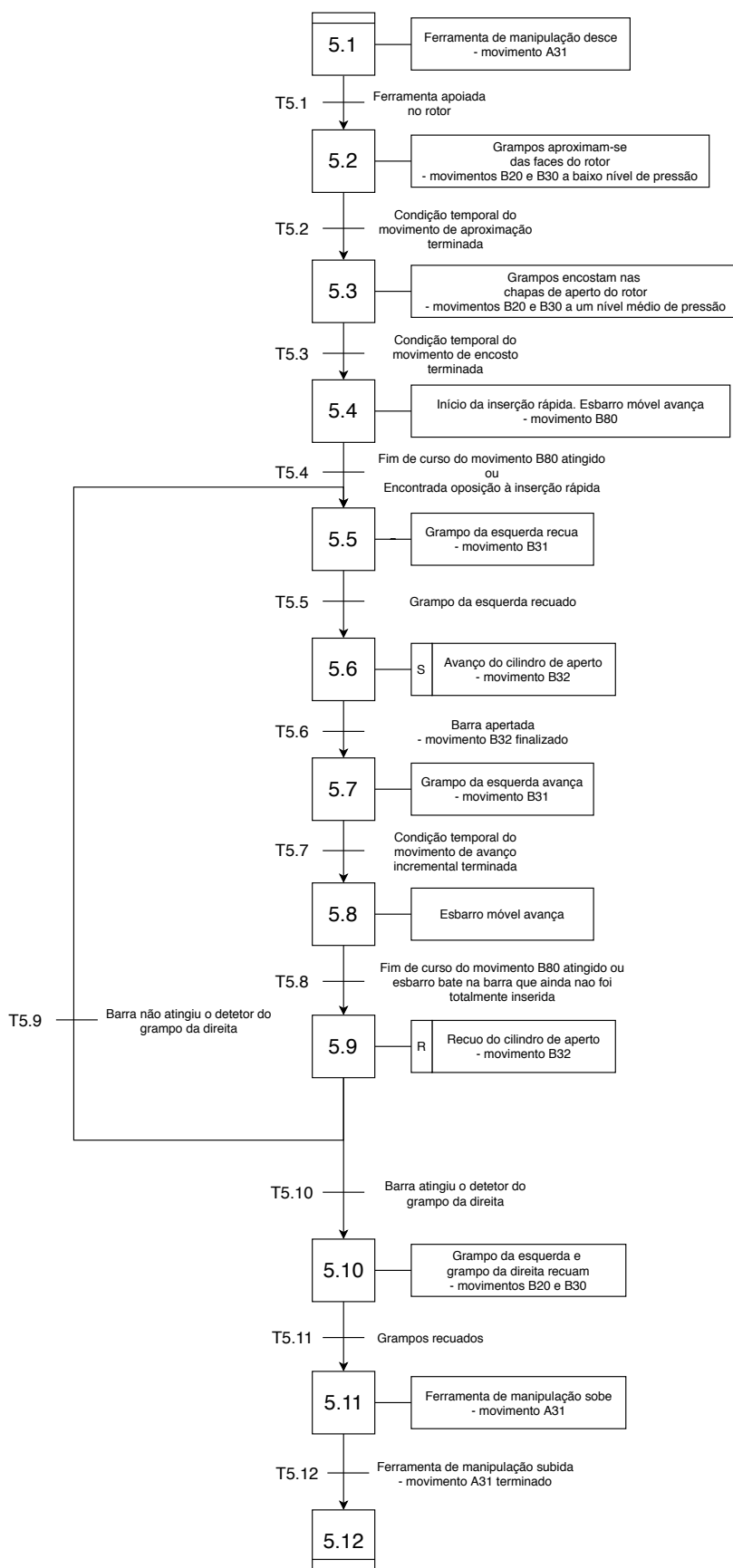


Figura B.6 - Grafket M5

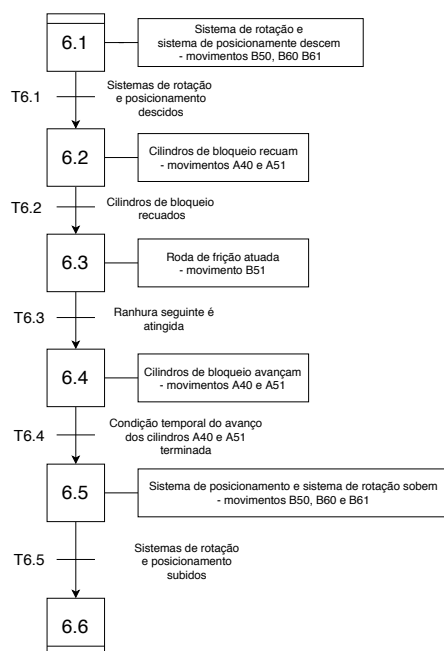


Figura B.7 - Graficet M6

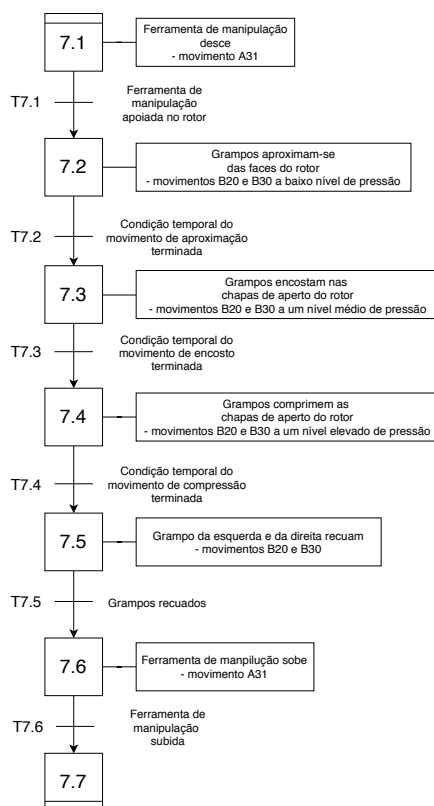


Figura B.8 - Graficet M7

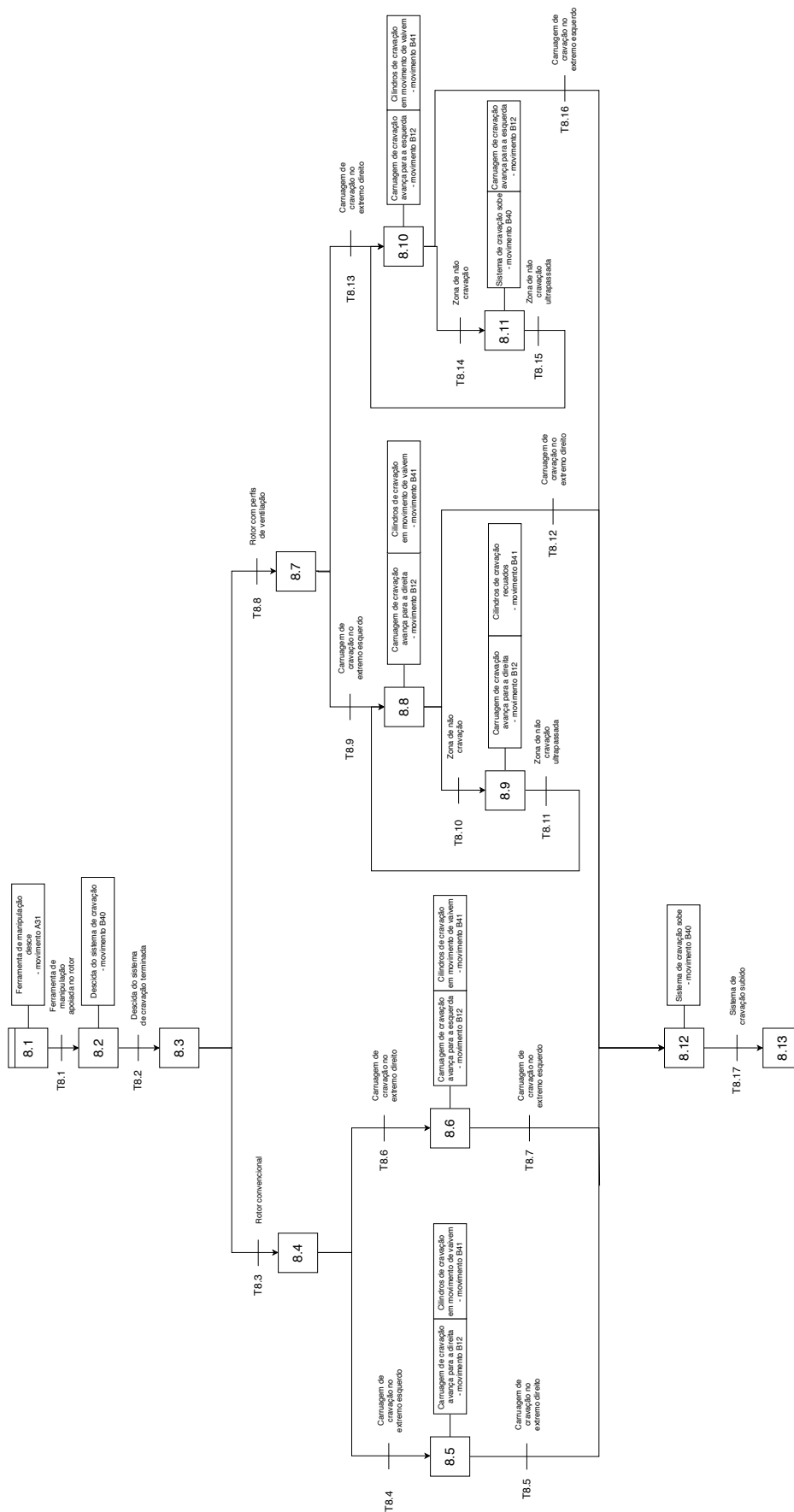


Figura B.9 - Grafket M8